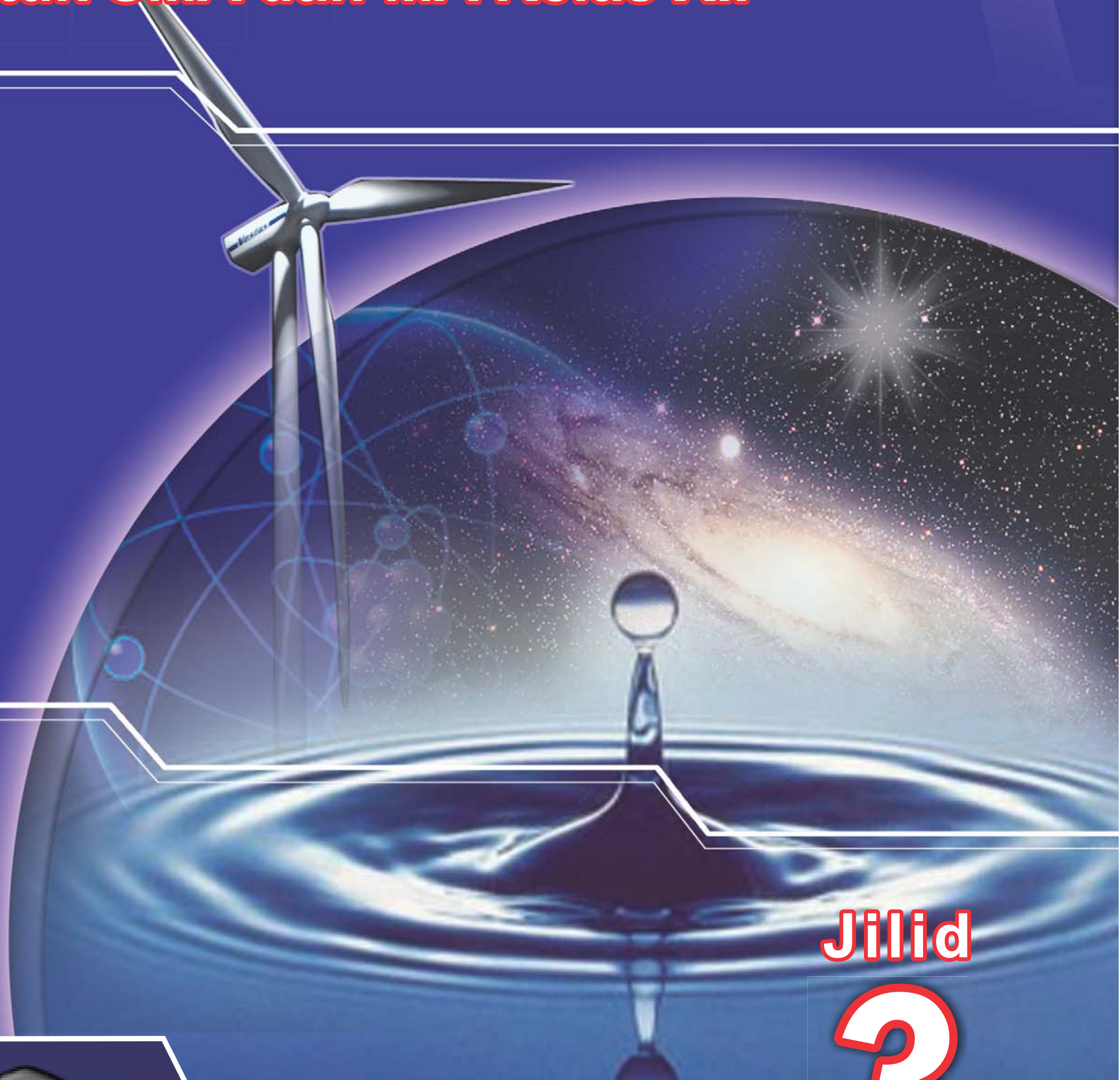
Suharyanto Karyono Dwi Satya Palupi

BUKU SEKOLAH bse ELEKTRONIK

FISIKA

untuk SMA dan MA Kelas XII



Jilid 3

Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional

Suharyanto Karyono Dwi Satya Palupi

FISIKA

untuk SMA dan MA Kelas XII



Jilid 3

Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional



FISIKA
untuk Kelas XII SMA dan MA

Penyusun	:	Suharyanto Karyono Dwi Satya Palupi
Desain Sampul	:	Uzi Sulistyo Adhi
Lay out	:	Sri Wahyuni
Ukuran Buku	:	17,6 x 25 cm

530.07
SUH SUHARYANTO
f Fisika : untuk SMA dan MA Kelas XII /
penulis, Suharyanto, Karyono,Dwi Satia Palupi .
— Jakarta : Pusat Perbukuan,
Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vi, 361 hlm, : ilus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 335
Indeks
ISBN 978-979-068-802-5 (nomor jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-810-0

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul
II. Karyono III. Dwi Satia Palupi

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2009

Diperbanyak oleh ....

Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/ penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan



Kata Pengantar

Buku Fisika ini disusun untuk membimbing peserta didik SMA/MA agar; (1) membentuk sikap positif terhadap fisika dengan menyadari keteraturan dan keindahan alam serta mengagungkan kebesaran Tuhan Yang Maha Esa, (2) memupuk sikap ilmiah yaitu jujur, obyektif, terbuka, ulet, kritis dan dapat bekerja sama dengan orang lain, (3) mengembangkan pengalaman untuk dapat merumuskan masalah, mengajukan dan menguji hipotesis melalui percobaan, merancang dan merakit instrumen percobaan, mengumpulkan, mengolah, dan menafsirkan data, serta mengkomunikasikan hasil percobaan secara lisan dan tertulis, (4) mengembangkan kemampuan bernalar dalam berpikir analisis induktif dan deduktif dengan menggunakan konsep dan prinsip fisika untuk menjelaskan berbagai peristiwa alam dan menyelesaikan masalah baik secara kualitatif maupun kuantitatif, dan (5) menguasai konsep dan prinsip fisika serta mempunyai keterampilan mengembangkan pengetahuan, dan sikap percaya diri sebagai bekal untuk melanjutkan pada jenjang yang lebih tinggi serta mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Cakupan materinya di samping sesuai dengan standar isi pendidikan juga disesuaikan dengan kemampuan siswa. Materi buku ini akurat, mutakhir, mengandung wawasan produktivitas, merangsang keingintahuan siswa, mengembangkan kecakapan hidup, dan kontekstual.

Penyajian materinya mudah dipahami karena bahasa yang digunakan dalam buku ini komunikatif dan interaktif, lugas, runtut, dan sesuai dengan kaidah bahasa Indonesia yang baku. Lebih dari itu, buku ini disajikan secara sistematis, logis, dan seimbang; dan disertai contoh-contoh dan latihan untuk mendorong kecakapan siswa.

Semoga buku ini bermanfaat bagi siswa-siswa SMA/MA untuk mencapai cita-cita luhurnya, yaitu menjadi putra bangsa yang terbaik, unggul, dan mempunyai daya saing secara global di masa datang.

Yogyakarta, Mei 2007

Penulis

Daftar Isi

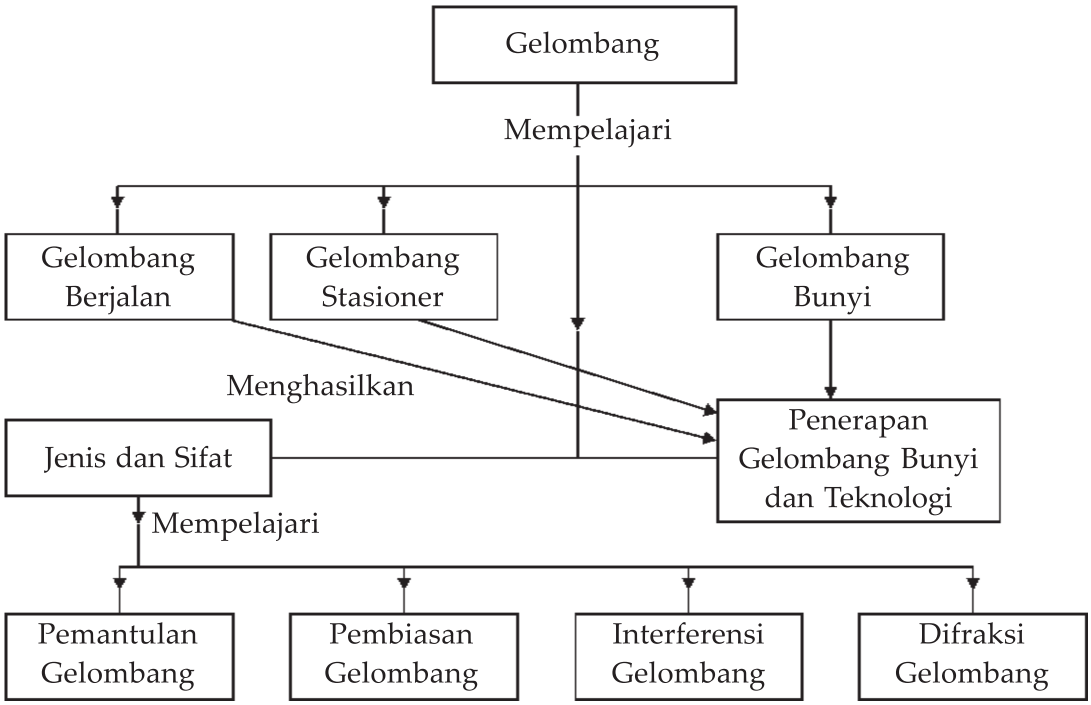
Bab I
Gelombang



Sumber : Ilmu Pengetahuan Populer 10

Seorang dokter dapat mendeteksi penyakit yang berbahaya di dalam organ tubuh pasien menggunakan gelombang ultrasonik.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu:

1. mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum,
2. mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi, dan
3. menerapkan konsep dan prinsip gelombang bunyi dalam teknologi.

Motivasi Belajar

Gelombang ada di sekitar kita, beriak dalam air, bergulung di ladang jagung, membuat kaki lipan bergerak teratur, serta menyampaikan bunyi dan cahaya pada kita. Pemanfaatan gelombang banyak dilihat dalam bidang komunikasi, kedokteran, industri, dan bidang penelitian keilmuan. Apakah sebenarnya gelombang itu dan bagaimana sifat-sifat gelombang?

Agar kalian dapat mengetahuinya, maka pelajarilah bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

gelombang, efek Doppler, SONAR

Dalam fisika dikenal berbagai macam gelombang, misalnya: gelombang cahaya, gelombang bunyi, gelombang tali, gelombang air, dan sebagainya, yang dikelompokkan berdasarkan sifat-sifat fisisnya. Apakah sebenarnya gelombang itu?

Gejala gelombang dapat diperlihatkan dengan mudah, apabila kita melemparkan batu ke dalam kolam yang airnya tenang, maka pada permukaan air kolam itu akan timbul usikan yang merambat dari tempat batu itu jatuh ke tepi kolam. Usikan yang merambat pada permukaan air tersebut disebut *gelombang*.

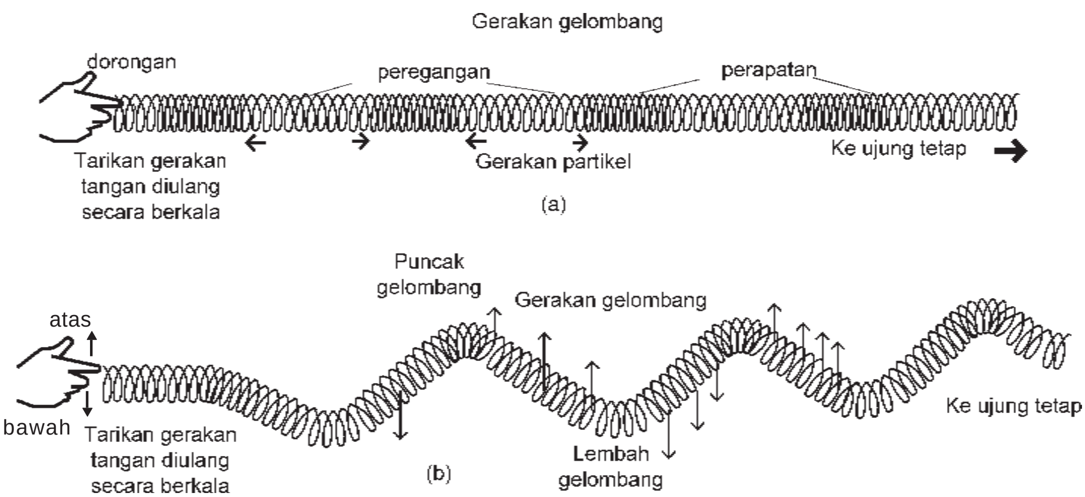
Apabila di permukaan air itu terdapat benda terapung, misalnya kayu, maka kayu itu hanya bergerak naik turun tidak ikut bergerak ke tepi. Hal ini menunjukkan bahwa yang merambat hanya gelombangnya, sedangkan airnya tidak ikut bergerak bersama gelombang. Air hanya sebagai medium rambatan gelombang. Jadi, pada perambatan gelombang mediumnya tetap.

A. Jenis Gelombang dan Sifat-sifatnya

Gelombang didefinisikan sebagai getaran yang merambat melalui medium/perantara. Medium gelombang dapat berupa zat padat, cair, dan gas, misalnya tali, slinki, air, dan udara. Dalam perambatannya, gelombang membawa energi. Energi gelombang air laut sangat terasa bila kita berdiri di tepi pantai, berupa dorongan gelombang pada kaki kita.

Gelombang dapat dikelompokkan berdasarkan sifat-sifat fisisnya, yaitu :

1. Berdasarkan arah getarannya, gelombang dapat dibedakan menjadi dua, yakni gelombang longitudinal dan gelombang transversal.
   a. *Gelombang longitudinal,* yaitu gelombang yang arah getarannya berimpit dengan arah rambatannya, misalnya gelombang bunyi.
   b. *Gelombang transversal,* yaitu gelombang yang arah getarannya tegak lurus dengan arah rambatannya, misalnya gelombang pada tali dan gelombang cahaya.



Gambar 1.1 *Jenis-jenis gelombang (a) gelombang longitudinal, (b) gelombang transversal.*

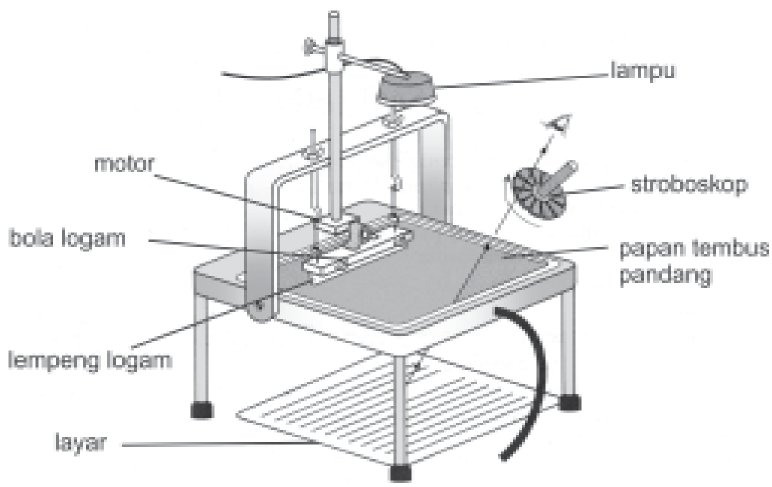
2. Berdasarkan amplitudonya, gelombang dapat dibedakan menjadi dua, yakni gelombang berjalan dan gelombang diam/berdiri.
   a. *Gelombang berjalan,* yaitu gelombang yang amplitudonya tetap pada setiap titik yang dilalui gelombang, misalnya gelombang pada tali.
   b. *Gelombang diam/berdiri,* yaitu gelombang yang amplitudonya berubah, misalnya gelombang pada senar gitar yang dipetik.
3. Berdasarkan zat perantara atau medium rambatannya, gelombang dibedakan menjadi dua, yakni gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik.
   a. *Gelombang mekanik,* yaitu gelombang yang dalam perambatannya memerlukan medium, misalnya

gelombang air, gelombang pada tali, dan gelombang bunyi.

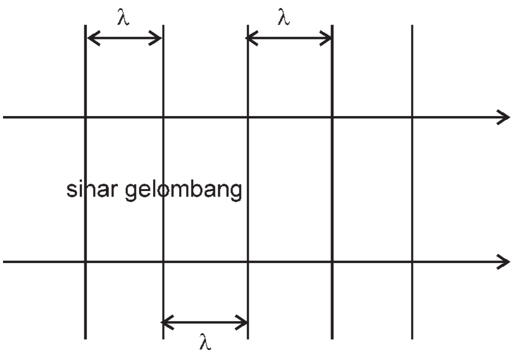
b. *Gelombang elektromagnetik* yaitu gelombang yang dalam perambatannya tanpa memerlukan medium, misalnya gelombang cahaya.

Pada bab ini kita hanya akan mempelajari tentang gelombang beserta besaran-besaran yang berkaitan dengan gelombang, yaitu *simpangan (Y)*, *amplitudo (A)*, *frekuensi (f)*, *periode (T)*, dan *fase* (φ) yang mana besaran tersebut sudah kita pelajari saat membahas tentang getaran di kelas XI semester 1. Pada prinsipnya gelombang adalah rambatan dari energi getaran. Semua gelombang mekanik maupun gelombang elektromagnetik mempunyai sifat-sifat yang sama yaitu *dapat dipantulkan (refleksi), dapat dibiaskan (refraksi), dapat saling berinterferensi (memadukan), dan mengalami difraksi (pelenturan), dispersi, dan polarisasi*.

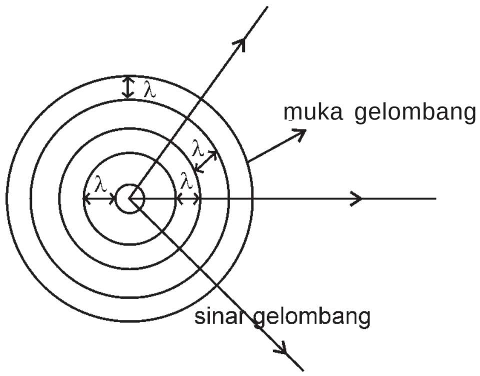
Untuk mempelajari sifat pada gelombang dapat dilakukan kegiatan percobaan mengamati gelombang yang terjadi di permukaan air dengan menggunakan *tangki riak* atau *tangki gelombang (ripple tank)*. Pada dasarnya tangki riak terdiri atas tangki air yang dasarnya terbuat dari kaca, motor listrik sebagai sumber getar yang diletakkan di atas papan penggetar dan akan menggetarkan papan penggetar yang berupa plat/keping untuk pembangkit gelombang lurus dan pembangkit berbentuk bola kecil untuk membangkitkan gelombang lingkaran. Sebuah lampu diletakkan di atas tangki riak untuk menyinari permukaan logam. Di bawah tangki riak diletakkan kertas putih untuk mengamati bentuk gelombang pada permukaan air. Puncak dan dasar gelombang akan terlihat pada kertas putih (layar) berupa garis gelap dan terang.



Gambar 1.2 *Tangki riak dipergunakan untuk mengamati sifat-sifat gelombang*



Gambar 1.3a Muka gelombang lurus

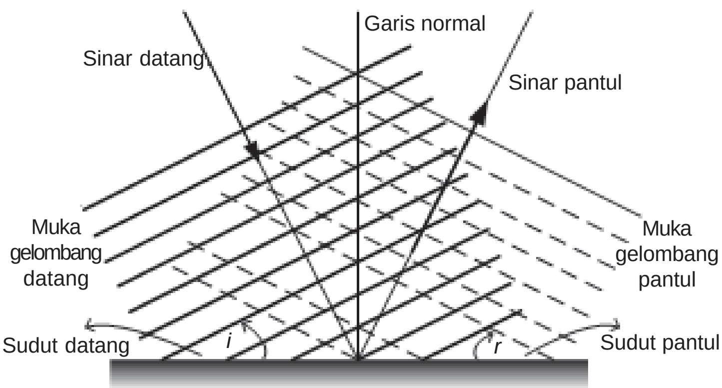


Gambar 1.3b Muka gelombang lingkaran

Sebelum membicarakan sifat gelombang, akan kita bahas mengenai pengertian *front gelombang* atau *muka gelombang* dan *sinar gelombang*. Apabila kita menggunakan keping getar, maka pada permukaan air akan kita lihat garis lurus yang bergerak ke tepi dan jika kita menggunakan bola sebagai penggetarnya, maka pada permukaan timbul lingkaran-lingkaran yang bergerak ke tepi. Sekumpulan garis-garis atau lingkaran-lingkaran itu yang dinamakan *front gelombang* atau *muka gelombang*. Jadi muka gelombang didefinisikan sebagai tempat sekumpulan titik yang mempunyai fase yang sama pada gelombang. Muka gelombang dapat berbentuk garis lurus atau lingkaran (Lihat **Gambar 1.3a** dan **1.3b**).

Tempat kedudukkan titik yang mempunyai fase yang sama mempunyai jarak 1λ, 2λ, 3λ ..., dan seterusnya, sehingga jarak antarfront gelombang yang saling berdekatan sebesar 1λ seperti ditunjukkan dalam gambar. Setiap gelombang merambat menurut arah tertentu. Arah rambatan gelombang disebut *sinar gelombang*. Sinar gelombang arahnya selalu tegak lurus muka gelombang.

1. Pemantulan Gelombang

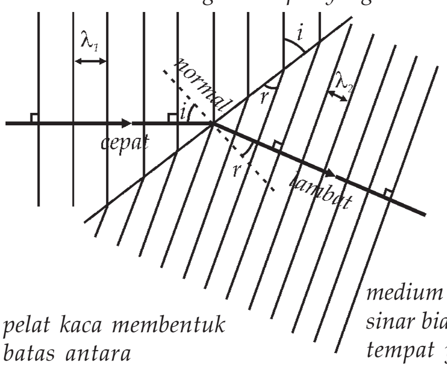


Gambar 1.4 Pemantulan gelombang lurus

Untuk mengamati pemantulan gelombang dapat dilakukan dengan menempatkan balok kaca atau logam pada tangki riak sebagai penghalang gelombang yang mempunyai muka gelombang lurus. Sinar gelombang tersebut akan dipantulkan pada saat mengenai dinding penghalang tersebut. Dalam pemantulan gelombang tersebut berlaku hukum pemantulan gelombang yaitu :

a) sudut datang gelombang sama dengan sudut pantul gelombang, dan
b) gelombang datang, gelombang pantul, dan garis normal terletak dalam satu bidang datar.

2. Pembiasan Gelombang



Gambar 1.5 *Pembiasan gelombang*

Untuk mempelajari pembiasan gelombang dapat dilakukan dengan menempatkan balok kaca/logam pada tangki riak yang seluruhnya berada di dalam air, sehingga akan membedakan kedalaman permukaan air dalam tangki riak. Hal ini untuk menggambarkan adanya dua medium rambatan gelombang, permukaan dalam menggambarkan medium yang rapat dan permukaan air yang dangkal menggambarkan medium yang kurang rapat. Sinar gelombang yang melewati bidang batas antara kedalaman air terlihat dibelokkan/dibiaskan di mana front gelombangnya menjadi lebih rapat. Hal ini menunjukkan adanya perubahan panjang gelombang, akan tetapi frekuensinya tetap yaitu sama dengan frekuensi sumber getarnya. Dalam pembiasan gelombang berlaku hukum pembiasan yang menyatakan :

Perbandingan sinus sudut datang dengan sinus sudut bias merupakan bilangan tetap.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \text{konstan}$$

Secara umum sering dituliskan :

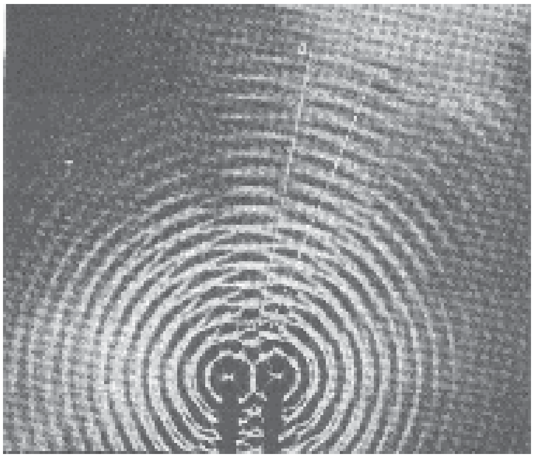
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_1}{n_2} = n_{2.1} \qquad \text{.... (1.1)}$$

dengan :

i = sudut datang gelombang (derajat atau radian)
r = sudut bias gelombang (derajat atau radian)
λ_1 = panjang gelombang pada medium 1 (m)
λ_2 = panjang gelombang pada medium 2 (m)

v_1	=	cepat rambat gelombang pada medium 1 (m/s)
v_2	=	cepat rambat gelombang pada medium 2 (m/s)
n_1	=	indeks bias medium 1
n_2	=	indeks bias medium 2
$n_{2.1}$	=	indeks bias relatif medium 2 terhadap medium 1

3. Interferensi Gelombang

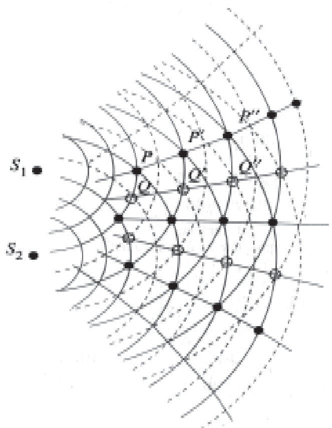


Sumber : *www.kmr.nada.kth.se*

Gambar 1.6 *Pola interferensi gelombang pada permukaan air*

Untuk menunjukkan gejala interferensi gelombang dapat dipergunakan dua sumber getar berbentuk bola atau sumber getar berupa keping/plat yang diberi dua lubang/celah di mana celah tersebut dapat dianggap sebagai sumber getaran (gelombang). Untuk mengamati gejala interferensi gelombang agar teramati dengan jelas, maka kedua gelombang yang berinterferensi tersebut harus merupakan dua gelombang yang *koheren*. Dua gelombang disebut koheren apabila kedua gelombang tersebut memiliki frekuensi dan amplitudo yang sama serta memiliki selisih fase yang tetap/konstan.

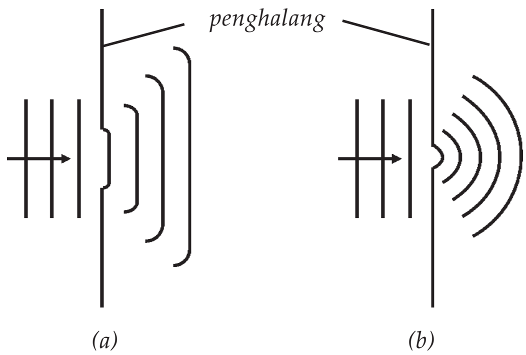
Ada dua sifat hasil interferensi gelombang, yaitu interferensi bersifat *konstruktif* dan *destruktif.* Interferensi bersifat konstruktif artinya saling memperkuat, yaitu saat kedua gelombang bertemu (berinterferensi) memiliki fase yang sama. Sedang interferensi bersifat destruktif atau saling melemahkan jika kedua gelombang bertemu dalam fase yang berlawanan.



Gambar 1.7 *Pola interferensi gelombang*

Gambar 1.7 menunjukkan pola interferensi yang ditunjukkan tangki riak, di mana garis tebal/tidak terputus adalah hasil interferensi yang bersifat konstruktif, sedangkan garis putus-putus menunjukkan interferensi yang bersifat destruktif.

4. Difraksi Gelombang



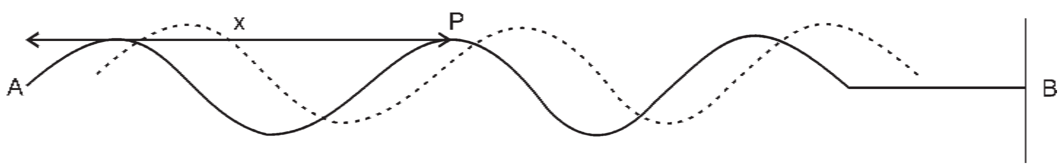
Gambar 1.8 *Difraksi gelombang (a) penghalang dengan celah lebar, (b) penghalang dengan celah sempit*

Untuk menunjukkan adanya difraksi gelombang dapat dilakukan dengan meletakkan penghalang pada tangki riak dengan penghalang yang mempunyai celah, yang lebar celahnya dapat diatur. *Difraksi gelombang* adalah peristiwa pembelokan/penyebaran (lenturan) gelombang jika gelombang tersebut melalui celah. Gejala difraksi akan semakin tampak jelas apabila lebar celah semakin sempit. Dengan sifat inilah ruangan dalam rumah kita menjadi terang pada siang hari dikarenakan ada lubang kecil pada genting. Serta suara alunan musik dari tape recorder dapat sampai ke ruangan lain, meskipun kamar tempat *tape* tersebut pintunya tertutup rapat.

B. Gelombang Berjalan

1. Persamaan Gelombang Berjalan

Seutas tali AB yang kita bentangkan mendatar (**Gambar 1.9**). Ujung B diikatkan pada tiang, sedangkan ujung A kita pegang. Apabila ujung A kita getarkan naik turun terus-menerus, maka pada tali tersebut akan terjadi rambatan gelombang dari ujung A ke ujung B. Misalkan amplitudo getarannya A dan gelombang merambat dengan kecepatan v dan periode getarannya T.



Gambar 1.9 *Gelombang berjalan pada tali*

Misalkan titik P terletak pada tali AB berjarak x dari ujung A dan apabila titik A telah bergetar selama t sekon, maka titik P telah bergetar selama $t_P = \left(t - \frac{x}{v}\right)$, di mana $\frac{x}{v}$ adalah waktu yang diperlukan gelombang merambat dari A ke P.

Persamaan simpangan titik P pada saat itu dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Y_P = A \sin \omega t_P$$

$$Y_P = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right)$$

di mana $\omega = 2\pi f = \dfrac{2\pi}{T}$ maka persamaan tersebut dapat ditulis menjadi : $Y_P = A \sin \left(\omega t - \dfrac{2\pi x}{Tv} \right) = A \sin \left(\omega t - \dfrac{2\pi x}{\lambda} \right)$.

Jika $\dfrac{2\pi}{\lambda} = k$, di mana k didefinisikan sebagai *bilangan gelombang* maka persamaan simpangan dapat dituliskan menjadi :

$$Yp = A \sin (\omega t - kx) \qquad \text{.... (1.2)}$$

Persamaan tersebut yang disebut sebagai persamaan gelombang berjalan yang secara umum dapat dituliskan :

$$Yp = A \sin (\omega t \pm kx) \qquad \text{....(1.3)}$$

Dalam persamaan di atas dipakai nilai negatif (-) jika gelombang berasal dari sebelah kiri titik P atau gelombang merambat ke kanan dan dipakai positif (+) jika gelombang berasal dari sebelah kanan titik P atau gelombang merambat ke kiri.

2. Sudut Fase, Fase, dan Beda Fase pada Gelombang

Seperti halnya pada getaran, pada gelombang pun dikenal pengertian sudut fase, fase, dan beda fase. Oleh karena itu perhatikan lagi persamaan gelombang berjalan berikut ini!

$$Y_P = A \sin (\omega t - kx) = A \sin \left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

di mana θ disebut sudut fase sehingga :

$$\theta_P = (\omega t - kx) = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \qquad \text{.... (1.4)}$$

Mengingat hubungan antara sudut fase (θ) dengan fase (φ) adalah $\theta = 2\pi\varphi$ maka *fase* titik P adalah:

$$\varphi_P = \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \qquad \text{.... (1.5)}$$

Apabila pada tali tersebut terdapat dua buah titik, titik P yang berjarak x_1 dari titik asal getaran dan titik Q yang berjarak x_2 dari titik asal getaran, maka besarnya beda fase antara titik P dan Q adalah $\Delta\varphi = \varphi_P - \varphi_Q = \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda}\right) - \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda}\right)$

$$\Delta\varphi = \left(\frac{x_2 - x_1}{\lambda}\right) = \frac{\Delta x}{\lambda} \qquad \text{.... (1.6)}$$

Contoh Soal

Sebuah gelombang merambat pada tali yang memenuhi persamaan : $Y = 0{,}4 \sin 2\pi\,(60\,t - 0{,}4\,x)$ di mana Y dan x dalam meter dan t dalam sekon, tentukanlah :

a. amplitudo gelombang,
b. frekuensi gelombang,
c. panjang gelombang,
d. cepat rambat gelombang, dan
e. beda fase antara titik A dan B pada tali itu yang terpisah sejauh 1 m.

Penyelesaian :

Untuk menyelesaikan persoalan gelombang berjalan yang diketahui persamaan gelombangnya, kita mengubah bentuk persamaan gelombang tersebut ke dalam bentuk persamaan gelombang umum.

Diketahui : $Y = 0{,}4 \sin 2\pi\,(60\,t - 0{,}4\,x)$

Ditanyakan :
a. $A = \ldots$?
b. $f = \ldots$?
c. $\lambda = \ldots$?
d. $v = \ldots$?
e. $\Delta\varphi = \ldots$?

Jawab :

$Y = 0{,}4 \sin 2\pi\,(60\,t - 0{,}4x)$ diubah menjadi bentuk

$Y = 0{,}4 \sin (120\pi\,t - 0{,}8\pi x)$

$Y_P = A \sin (\omega t - kx)$

a. $A = 0{,}4$ m

b. $\omega t = 120\,\pi t$

$$\omega = 2\pi f \rightarrow 2\pi f = 120\,\pi \rightarrow f = \frac{120\pi}{2\pi} = 60 \text{ Hz}$$

c. $k = 0{,}8\pi \rightarrow \dfrac{2\pi}{\lambda} = 0{,}8\pi \rightarrow \lambda = \dfrac{2\pi}{0{,}8\pi} = 2{,}5$ m

d. $v = f \times \lambda = 60 \times 2{,}5 = 150$ m/s

e. $\Delta\varphi = \dfrac{\Delta x}{\lambda} = \dfrac{1}{2{,}5} = \dfrac{2}{5}$

Soal Latihan :

1. Sebuah gelombang merambat pada tali memenuhi persamaan $Y = 0{,}2 \sin (10\pi t - 0{,}2\pi x)$, jika Y dan x dalam meter dan t dalam sekon, tentukanlah :
   a. amplitudo gelombang,
   b. frekueksi gelombang,
   c. panjang gelombang,
   d. cepat rambat gelombang,
   e. beda fase antara titik A dan B pada tali itu yang terpisah sejauh 2,5 m.

2. Gelombang transversal merambat pada tali memenuhi persamaan $Y = 0{,}5 \sin \pi (60t + 0{,}5x)$ jika Y dan x dalam meter dan t dalam sekon, tentukanlah :
   a. amplitudo gelombang,
   b. frekuensi gelombang,
   c. panjang gelombang,
   d. cepat rambat gelombang,
   e. beda fase antara titik A dan B pada tali itu yang terpisah sejauh 3 m.

Life Skills : Kecakapan Akademik

Sebuah tali yang panjang dibentangkan horisontal, apabila salah satu ujungnya digetarkan terus-menerus dengan periode 0,2 s dengan amplitudo 20 cm, sehingga pada tali merambat gelombang transversal dengan kecepatan 10 m/s. Sebuah titik P terletak pada jarak 2,5 m dari ujung yang digetarkan. Tuliskan bentuk persamaan simpangan titik P tersebut!

Hasilnya dikumpulkan kepada guru kalian!

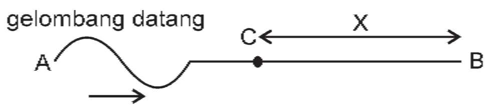
C. Gelombang Stasioner

Cobalah ambil seutas tali yang panjangnya kira-kira 4 - 5 meter, kemudian ikatkan salah satu ujungnya pada tiang dan ujung yang lain kalian getarkan naik turun. Pada tali tersebut akan merambat gelombang dari ujung tali yang kita getarkan ke ujung yang terikat. Coba perhatikan apa yang terjadi pada ujung gelombang saat mencapai bagian tali yang terikat, ternyata gelombang itu akan dipantulkan kembali ke arah semula. Antara gelombang datang dengan gelombang pantul ini akan saling berinterferensi, sehingga menimbulkan gelombang yang disebut *gelombang stasioner* atau *gelombang berdiri.*

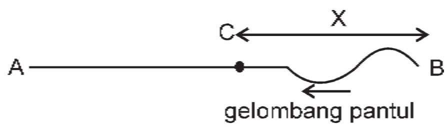
Gelombang stasioner terjadi jika dua gelombang yang mempunyai frekuensi dan amplitudo sama bertemu dalam arah yang berlawanan. Gelombang stasioner memiliki ciri-ciri, yaitu terdiri atas simpul dan perut. *Simpul* yaitu tempat kedudukan titik yang mempunyai amplitudo minimal (nol), sedangkan *perut* yaitu tempat kedudukan titik-titik yang mempunyai amplitudo maksimum pada gelombang tersebut. Gelombang stasioner dapat dibedakan menjadi dua, yaitu Gelombang stasioner yang terjadi pada ujung pemantul bebas dan gelombang stasioner yang terjadi pada ujung pemantul tetap.

1. Gelombang Stasioner pada Ujung Bebas

Coba sekali lagi lakukan kegiatan seperti di depan, akan tetapi ikatan tali pada tiang dibuat longgar sehingga tali dapat bergerak bebas pada tiang tersebut. Kemudian buatlah usikan pada tali itu yang menimbulkan rambatan satu gelombang dan coba kalian perhatikan bagaimana pemantulan gelombangnya. Hasil pengamatanmu akan sesuai dengan **Gambar 1.10a** dan **1.10b**.



Gambar 1.10a *Gelombang datang*



Gambar 1.10b *Gelombang pantul*

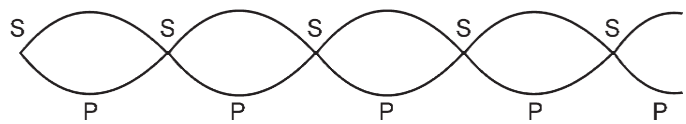
Apabila ujung bebas telah bergetar selama t sekon, maka persamaan gelombang datang pada titik C dinyatakan $Y_d = A \sin (\omega t - kx)$ dan persamaan gelombang pantul yang sampai di titik C dinyatakan $Y_p = A \sin (\omega t + kx)$. Persamaan gelombang stasioner dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan gelombang datang dan gelombang pantul yang sampai di titik C, yaitu sebagai berikut :

$$
\begin{aligned}
Y_C &= Y_d + Y_p \\
&= A \sin (\omega t - kx) + A \sin (\omega t + kx) \\
&= A \; \{\sin (\omega t - kx) + \sin (\omega t + kx)\} \\
&= 2A \sin \frac{1}{2} \{(\omega t - kx) + (\omega t + kx)\} \cos \frac{1}{2} \{(\omega t - kx) - (\omega t + kx)\} \\
&= 2A \sin \omega t \cos kx
\end{aligned}
$$

atau

$$Y_C = 2A \cos kx \sin \omega t \qquad \text{.... (1.7)}$$

Jika $2A \cos kx = A'$ maka persamaan dapat ditulis $Y_C = A' \sin \omega t$. Di mana A' = amplitudo gelombang stasioner pada dawai ujung bebas, yang berarti bahwa amplitudo gelombang stasioner tergantung pada *jarak suatu titik terhadap ujung pemantul (x).*



Gambar 1.11 *Gelombang stasioner ujung bebas*

Maka letak simpul-simpul gelombang stasioner pada ujung bebas jika $A' = 0$, A' akan sama dengan nol jika $\cos kx = 0$, jadi nilai $kx = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi$, dan seterusnya.

Jadi secara berurutan letak-letak simpul dari ujung bebas dapat ditentukan sebagai berikut :

a. Simpul pertama $kx_1 = \frac{1}{2}\pi$ $\quad x_1 = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{1}{4}\lambda$

b. Simpul kedua $kx_2 = \frac{3}{2}\pi$ $\quad x_2 = \frac{3\pi}{2k} = \frac{3\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{3}{4}\lambda$

c. Simpul ketiga $kx_3 = \frac{5}{2}\pi$ $\quad x_3 = \frac{5\pi}{2k} = \frac{5\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{5}{4}\lambda$

d. Simpul keempat $kx_4 = \frac{7}{2}\pi$ $\quad x_4 = \frac{7\pi}{2k} = \frac{7\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{7}{4}\lambda$

dan seterusnya.

Dari data tersebut letak simpul-simpul gelombang stasioner pada ujung bebas dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

$$x = (2n - 1)\frac{1}{4}\lambda \qquad \text{.... (1.8)}$$

di mana x = jarak simpul dari ujung bebas

n = 1, 2, 3… dan seterusnya (orde simpul)

λ = panjang gelombang stasioner

Perut gelombang terjadi jika A' mencapai harga maksimum, A' akan maksimum jika cos kx = 1, jadi nilai $kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi$ dan seterusnya.

Letak kedudukan perut gelombang dari ujung bebas dapat dinyatakan sebagai berikut :

a. Perut pertama $kx_1 = 0$ $\quad x_1 = 0$

b. Perut kedua $kx_2 = \pi$ $\quad x_2 = \frac{\pi}{k} = \frac{\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{1}{2}\lambda$

c. Perut ketiga $kx_3 = 2\pi$ $\quad x_3 = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{2}{2}\lambda = \lambda$

d. Perut keempat $kx_4 = 3\pi$ $\quad x_4 = \frac{3\pi}{k} = \frac{3\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{3}{2}\lambda$

e. Perut kelima $kx_5 = 4\pi$ $\quad x_5 = \frac{4\pi}{k} = \frac{4\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{4}{2}\lambda = 2\lambda$

dan seterusnya.

Dari data tersebut letak kedudukan perut-perut gelombang stasioner dari ujung bebas dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$x = (n - 1)\frac{1}{2}\lambda \qquad .... (1.9)$$

di mana x = jarak perut gelombang dari ujung bebas
n = 1, 2, 3, ... dan seterusnya (orde perut)

Contoh Soal

Sebuah tali yang panjang, salah satu ujungnya digetarkan terus-menerus dengan amplitudo 10 cm, periode 2 s, sedangkan ujung yang lain dibuat bebas. Jika cepat rambat gelombang pada tali tersebut 18 cm/s dan pada tali terjadi gelombang stasioner, tentukanlah :

a. amplitudo gelombang stasioner pada titik P yang berjarak 12 cm dari ujung bebas,
b. letak simpul ke-2 dan perut ke-3 dari ujung bebas.

Penyelesaian :

Diketahui : A = 10 cm
T = 2s
v = 18 cm/s
$\lambda = v \times T$ = 18 cm/s × 2s = 36 cm
$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{36} = \frac{\pi}{18}$

Ditanyakan : a. A_P = ...? (x = 12 cm)
b. letak simpul ke-2 = ...?
letak perut ke-3 = ...?

Jawab :

a. Besarnya amplitudo di titik P yang berjarak 20 cm dari ujung bebas adalah :

$A_P = 2A \cos kx$

$= 2A \cos \frac{\pi}{18} 12$

$= 2 \times 10 \cos \frac{2}{3}\pi$

$= 20 \cos \frac{2}{3} (180^o)$

$= 20 \cos 120^o$

$= 20 \times (-\frac{1}{2}) = -10$ cm

Besarnya amplitudo diambil harga mutlak/positifnya yaitu 10 cm.

b. Letak simpul ke-2

$X_{S2} = (2n - 1) \frac{1}{4}\lambda$

$= (2.2 - 1) \frac{1}{4} \times 36$

$= \frac{3}{4} \times 36$

$= 27$ cm

Letak perut ke-3

$X_{P3} = (n - 1) \frac{1}{2}\lambda$

$= (3 - 1) \frac{1}{2} \times 36$

$= 2 \times 18$

$= 36$ cm

Soal Latihan :

1. Sebuah tali yang panjang salah satu ujungnya digetarkan secara kontinu dengan amplitudo 20 cm dan periodenya 4 s, sehingga pada tali tersebut terbentuk gelombang stasioner. Jika cepat rambat gelombang pada tali tersebut 20 m/s. tentukanlah :
   a. persamaan gelombang stasioner pada tali tersebut,
   b. jarak antara tiga simpul yang berurutan,
   c. letak perut ke-4.
2. Jika jarak simpul ke-3 dari ujung bebas adalah 50 cm, tentukanlah jarak perut ke-5 dari ujung bebas!

3. Jika jarak 3 perut yang berurutan pada gelombang stasioner adalah 60 cm, tentukanlah letak perut ke-2 dan simpul 3 dari ujung bebas!

Life Skills : Kecakapan Akademik

Sebuah tali yang panjangnya 250 cm salah satu ujungnya digetarkan secara kontinu dengan amplitudo 10 cm dan periodenya 2 s. Jika cepat rambat gelombang pada tali 25 m/s dan pada tali tersebut terjadi gelombang stasioner, tentukanlah :

a. bentuk persamaan gelombang stasioner pada tali tersebut,

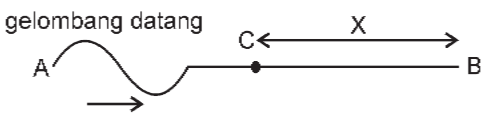
b. letak perut ke-3 dari titik asal getaran,

c. letak simpul ke-2 dari titik asal getaran.

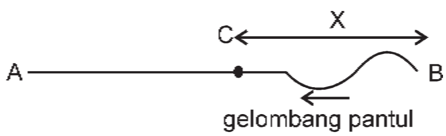
Hasilnya dikumpulkan kepada guru kalian!

2. Gelombang Stasioner pada Ujung Terikat

Coba sekali lagi lakukan kegiatan di depan, akan tetapi mengikatnya tali pada tiang dibuat kuat sehingga tali tersebut tidak dapat bergerak. Selanjutnya kalian buat usikan pada tali itu yang menimbulkan rambatan satu gelombang dan coba perhatikan bagaimana pemantulan gelombangnya. Hasil pengamatanmu akan sesuai dengan **Gambar 1.12a** dan **1.12b**.



Gambar 1.12a *Gelombang datang*



Gambar 1.12b *Gelombang pantul*

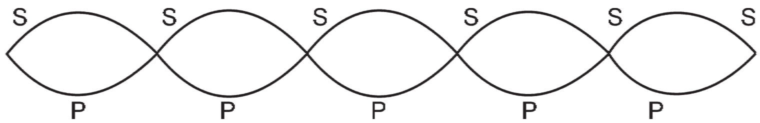
Pada ujung tetap ternyata hasil pemantulan gelombang terjadi loncatan fase sebesar $\frac{1}{2}$ sehingga gelombang yang tadinya datang berwujud bukit gelombang dipantulkan berupa lembah gelombang. Apabila ujung bebas telah bergetar selama t sekon maka persamaan gelombang datang pada titik C dinyatakan $Y_d = A \sin(\omega t - kx)$ dan persamaan gelombang pantul yang sampai di titik C dinyatakan $Y_p = A \sin(\omega t + kx) = -A \sin(\omega t + kx)$. Persamaan gelombang stasioner dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan gelombang datang dan gelombang pantul yang sampai di titik C yaitu sebagai berikut.

$$Y_C = Y_d + Y_p$$
$$= A \sin(\omega t - kx) - A \sin(\omega t + kx)$$
$$= A \{\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx)\}$$
$$= 2A \cos\frac{1}{2}\{(\omega t - kx) + (\omega t + kx)\} \sin\frac{1}{2}\{(\omega t - kx) - (\omega t + kx)\}$$
$$= 2A \cos \omega t \sin kx$$

atau

$$Y_C = 2A \sin kx \cos \omega t \quad .... (1.10)$$

Jika 2A sin $kx = A'$ maka persamaan dapat ditulis $Y_P = A' \cos \omega t$, di mana A' = amplitudo gelombang stasioner pada **dawai** ujung terikat.



Gambar 1.13 *Gelombang stasioner ujung terikat*

Oleh karena itu, letak simpul-simpul gelombang stasioner pada ujung terikat jika $A' = 0$, A' akan sama dengan nol jika $\sin kx = 0$, jadi nilai $kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, 4\pi$, dan seterusnya.

Jadi secara berurutan letak-letak simpul dari ujung terikat dapat ditentukan sebagai berikut.

a. Simpul pertama $kx_1 = 0$ $\quad x_1 = 0$

b. Simpul kedua $kx_2 = \pi$ $\quad x_2 = \dfrac{\pi}{k} = \dfrac{\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \dfrac{1}{2}\lambda$

c. Simpul ketiga $kx_3 = 2\pi$ $\quad x_3 = \dfrac{2\pi}{k} = \dfrac{2\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \dfrac{2}{2}\lambda = \lambda$

d. Simpul keempat $kx_4 = 3\pi$ $\quad x_4 = \dfrac{3\pi}{k} = \dfrac{3\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \dfrac{3}{2}\lambda$

e. Simpul kelima $kx_5 = 4\pi$ $\quad x_5 = \dfrac{4\pi}{k} = \dfrac{4\pi}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \dfrac{4}{2}\lambda = 2\lambda$

dan seterusnya.

Berdasarkan data tersebut letak simpul-simpul gelombang stasioner pada ujung terikat dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$x = (n - 1)\frac{1}{2}\lambda \qquad \text{.... (1.11)}$$

di mana x = jarak simpul dari ujung terikat

n = 1, 2, 3… dan seterusnya (orde simpul)

λ = panjang gelombang stasioner

Perut gelombang terjadi jika A' mencapai harga maksimum, A' akan maksimum jika cos kx = 1, jadi nilai $kx = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi$, dan seterusnya.

Letak kedudukan perut gelombang dari ujung terikat dapat dinyatakan sebagai berikut :

a. Perut pertama $kx_1 = \frac{1}{2}\pi$ $\qquad x_1 = \frac{\pi}{2k} = \frac{\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{1}{4}\lambda$

b. Perut kedua $kx_2 = \frac{3}{2}\pi$ $\qquad x_2 = \frac{3\pi}{2k} = \frac{3\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{3}{4}\lambda$

c. Perut ketiga $kx_3 = \frac{5}{2}\pi$ $\qquad x_3 = \frac{5\pi}{2k} = \frac{5\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{5}{4}\lambda$

d. Perut keempat $kx_4 = \frac{7}{2}\pi$ $\qquad x_4 = \frac{7\pi}{2k} = \frac{7\pi}{2\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{7}{4}\lambda$

dan seterusnya.

Berdasarkan data tersebut letak kedudukan perut-perut gelombang stasioner dari ujung terikat dinyatakan dalam persamaan :

$$x = (2n - 1)\frac{1}{4}\lambda \qquad \text{.... (1.12)}$$

di mana x = jarak perut dari ujung bebas
n = 1,2,3… dan seterusnya (orde perut)
λ = panjang gelombang stasioner

Wawasan Produktivitas : Kreatif

Cobalah kamu perhatikan alat-alat musik petik yang pernah kamu lihat. Misalnya gitar, pada sebuah gitar pada umumnya dilengkapi 6 buah senar yang mempunyai panjang yang hampir sama tetapi memiliki diameter yang berbeda-beda. Apabila masing-masing senar tersebut dipetik ternyata pada senar yang paling kecil diameternya menghasilkan nada yang frekuensinya paling tinggi dibandingkan dengan senar yang lainnya, demikian juga jika panjangnya diperpendek bila dipetik nada yang dihasilkannya pun semakin tinggi.

Cobalah diskusikan dengan teman-teman kelompokmu, tergantung pada faktor apa saja yang memengaruhi frekuensi nada yang dihasilkan oleh sumber bunyi berupa senar dawai? Presentasikan hasil diskusi di depan kelas dan kumpulkan kepada guru fisika setelah selesai presentasi!

Contoh Soal

Sepotong tali yang panjangnya 5 meter, salah satu ujungnya terikat kuat sedangkan ujung yang lainnya digerakkan secara kontinu dengan amplitudo 10 cm dan frekuensi 4 Hz. Jika cepat rambat gelombang pada tali itu 8 m/s, tentukanlah :

a. amplitudo titik P yang terletak 1,5 meter dari ujung terikat,
b. jarak simpul ke-3 dari ujung terikat,
c. jarak perut ke-2 dari ujung terikat,

Penyelesaian :

a. Besarnya amplitudo di titik P yang berjarak 1,5 m dari ujung terikat adalah

$A_P = 2A \sin kx$
$= 2A \sin \pi\, 1,5$
$= 2 \times 10 \sin 1,5\, \pi$
$= 20 \sin 270^o$
$= 20\ (-1)$
$= -20$ cm

Besarnya amplitudo diambil harga mutlak/positifnya yaitu 20 cm.

b. Letak simpul ke-3

$$X_{S2} = (n-1)\frac{1}{2}\lambda$$
$$= (3-1)\frac{1}{2}\,2$$
$$= 2 \times 1$$
$$= 2 \text{ m}$$

Letak perut ke-3

$$X_{P3} = (2n-1)\frac{1}{4}\lambda$$
$$= (2.2-1)\frac{1}{4} \times 2$$
$$= (4-1)\frac{1}{2}$$
$$= 1 \text{ m}$$

Soal Latihan :

Sebuah tali yang panjangnya 6 m direntangkan horisontal, salah satu ujungnya terikat kuat sedangkan ujung yang lain digetarkan secara kontinu, sehingga terjadi gelombang stasioner. Jika jarak perut ke-5 dari ujung terikat 2,25 meter, tentukanlah :

a. panjang gelombang yang terjadi,
b. letak simpul ke 6 dari ujung terikat,
c. persamaan gelombang jika amplitudo getarannya 10 cm.

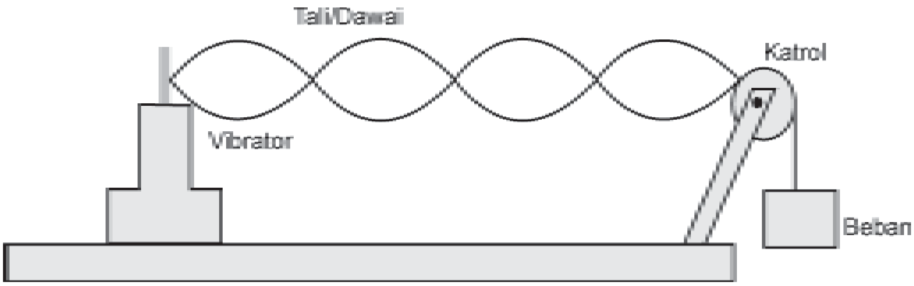
Life Skills : Kecakapan Akademik

Sebuah tali yang panjangnya 6 meter, salah satu ujungnya digetarkan dengan amplitudo 20 cm dan periodenya 0,2 sekon, sedangkan ujung yang lainnya terikat. Jika cepat rambat gelombang pada tali 8 m/s sehingga pada tali terbentuk gelombang stasioner, tentukanlah :

a. persamaan gelombangnya,
b. amplitudo titik P yang berjarak 2,4 m dari ujung terikat,
c. letak perut ke-2 dan simpul ke-3 dari titik asal getaran.

Hasilnya dikumpulkan kepada guru kalian!

D. Percobaan Melde



Gambar 1.14 *Alat Percobaan Melde*

Gambar (1.14) di atas menunjukkan peralatan yang digunakan untuk mengukur cepat rambat gelombang transversal pada sebuah dawai (senar). Apabila vibrator dihidupkan maka tali akan bergetar sehingga pada tali akan merambat gelombang transversal. Kemudian vibrator digeser menjauhi atau mendekati katrol secara perlahan-lahan sehingga pada tali timbul gelombang stasioner. Setelah terbentuk gelombang stasioner, kita dapat mengukur panjang gelombang yang terjadi (λ) dan jika frekuensi vibrator sama dengan f maka cepat rambat gelombang dapat dicari dengan $v = f.\lambda$. Untuk mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi cepat rambat gelombang dapat dilakukan dengan mengubah-ubah panjang tali, massa tali, dan tegangan tali (berat beban yang digantungkan). Orang yang pertama kali melakukan percobaan mengukur cepat rambat gelombang adalah **Melde**, sehingga percobaan seperti di atas dikenal dengan sebutan *Percobaan Melde*. Berdasarkan hasil percobaan diperoleh bahwa kecepatan merambat gelombang transversal pada dawai :

a. berbanding lurus dengan akar panjang dawai,
b. berbanding terbalik dengan akar massa dawai,
c. berbanding lurus dengan akar gaya tegangan dawai,
d. berbanding terbalik dengan akar massa per satuan panjang dawai,
e. berbanding terbalik dengan akar massa jenis dawai,
f. berbanding terbalik dengan akar luas penampang dawai.

Pernyataan tersebut jika dinyatakan dalam persamaan adalah sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{F\ell}{m}} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \quad \text{.... (1.13)}$$

dengan

v = cepat rambat gelombang (m/s, cm/s)
F = gaya tegangan dawai (N, dyne)
ℓ = panjang dawai (m, cm)
m = massa dawai (kg, gr)
μ = massa persatuan panjang dawai (kg/m, gr/cm)
ρ = massa jenis dawai (kg/m^3 , gr/cm^3)
A = luas penampang dawai (m^2 , cm^2)

Contoh Soal

Percobaan Melde menggunakan tali yang panjangnya 2 meter dan massanya 2,5 gr serta diberi gaya tegangan sebesar 50 N. Tentukan berapa m/s cepat rambat gelombang pada tali tersebut!

Penyelesaian :

Diketahui : ℓ = 2 m
$m = 2{,}5 \times 10^{-3}$ kg
F = 50 N

Ditanyakan : v = ... ?

Jawab : $v = \sqrt{\dfrac{F\ell}{m}} = \sqrt{\dfrac{50 \times 2}{2{,}5 \times 10^{-3}}} = \sqrt{40.000} = 200$ m/s

Jadi, cepat rambat gelombang pada tali adalah 200 m/s.

Life Skills : Kecakapan Sosial

Untuk mengukur kecepatan rambat gelombang transversal pada tali atau dawai dapat dilakukan dengan percobaan Melde. Cobalah membuat rancangan alat percobaan Melde dengan memanfaatkan barang-barang sederhana yang ada di sekitar kita secara berkelompok dengan 1 kelompok beranggota 5 orang. Buatlah langkah-langkah kerjanya dan lakukan percobaan untuk menguji alat tersebut. Buatlah kesimpulan berdasarkan hasil pengamatanmu pada percobaan tersebut dan laporkan secara tertulis kepada bapak/ibu guru fisika.

Soal Latihan :

a. Pada Percobaan Melde menggunakan tali yang panjangnya 2 m dan massanya 50 gram serta diberi beban yang massanya 0,5 kg. Tentukan cepat rambat gelombang yang terjadi pada tali tersebut!

b. Jika pada Percobaan Melde menggunakan tali yang panjangnya 50 cm dan massanya 2,5 gr. Ternyata cepat rambat gelombang yang terjadi 40 m/s, tentukan berapa N tegangan yang harus diberikan pada tali tersebut!

Life Skills : Kecakapan Akademik

Pada Percobaan Melde dengan menggunakan tali yang panjangnya 2 m dan massanya 2 gr serta diberi beban yang massanya 400 gr. Tentukan cepat rambat gelombang pada tali tersebut dan tentukan pula berapa massa beban yang harus digantungkan agar cepat rambat gelombangnya menjadi dua kalinya! Berkonsultasilah kepada guru kalian!

E. Gelombang Bunyi



Sumber : *Ilmu Pengetahuan Populer 5*
Gambar 1.15 *Setiap garputala dipukul, garputala bergetar, menimbulkan pemampatan dan perenggangan berganti-ganti yang konsentris sebagai sumber bunyi.*

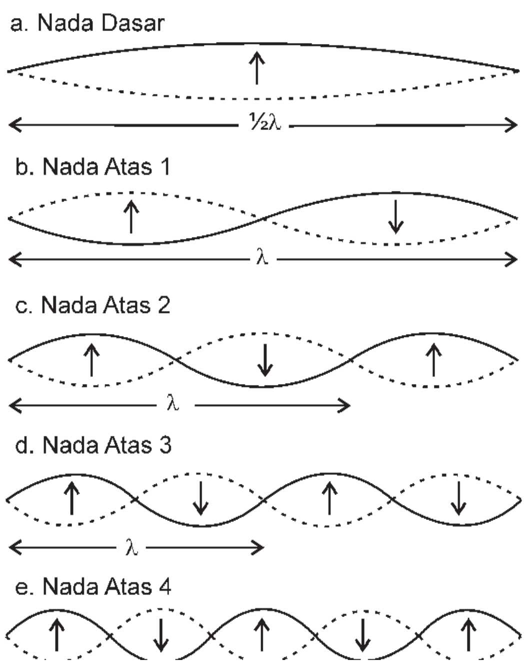
Gelombang bunyi merupakan salah satu contoh dari gelombang mekanik, yaitu gelombang merambat memerlukan zat perantara (medium perantara). Gelombang bunyi adalah gelombang mekanik yang berbentuk gelombang longitudinal, yaitu gelombang yang arah rambatannya sejajar dengan arah getarannya. Gelombang bunyi dihasilkan oleh benda yang bergetar, benda yang bergetar disebut *sumber bunyi*. Karena bunyi dihasilkan oleh benda yang bergetar, maka kuat kerasnya bunyi tergantung pada amplitudo getarannya. Makin besar amplitudo getarannya, makin keras bunyi terdengar dan sebaliknya makin kecil amplitudonya, makin lemah bunyi yang terdengar. Di samping itu, keras lemahnya bunyi juga tergantung pada jarak terhadap sumber bunyi, makin dekat dengan sumber bunyi, bunyi terdengar makin keras dan sebaliknya makin jauh dari sumber bunyi, makin lemah bunyi yang kita dengar. Gelombang bunyi berdasarkan daya pendengaran manusia dibedakan menjadi menjadi tiga, yaitu

audio/bunyi, infrasonik dan *ultrasonik*. *Audio* yaitu daerah gelombang bunyi yang dapat didengar oleh telinga manusia yang memiliki frekuensi berkisar antara 20 hingga 20.000 Hz. *Infrasonik* yaitu gelombang bunyi yang memiliki frekuensi di bawah 20 Hz. Sedangkan *ultrasonik* yaitu gelombang bunyi yang memiliki frekuensi di atas 20.000 Hz. Baik gelombang infrasonik maupun ultrasonik tidak dapat didengar oleh telinga manusia.

1. Sumber Bunyi

Sumber bunyi adalah sesuatu yang bergetar. Untuk meyakinkan hal ini tempelkan jari pada tenggorokan selama kalian berbicara, maka terasalah suatu getaran. Bunyi termasuk gelombang longitudinal. Alat-alat musik seperti gitar, biola, harmonika, seruling termasuk sumber bunyi. Pada dasarnya sumber getaran semua alat-alat musik itu adalah dawai dan kolom udara. Pada bab ini kita akan mempelajari nada-nada yang dihasilkan oleh sumber bunyi tersebut.

a. Sumber Bunyi Dawai



Gambar 1.16 *Pola gelombang nada-nada yang dihasilkan petikan dawai*

Sebuah gitar merupakan suatu alat musik yang menggunakan dawai/senar sebagai sumber bunyinya. Gitar dapat menghasilkan nada-nada yang berbeda dengan jalan menekan bagian tertentu pada senar itu, saat dipetik. Getaran pada senar gitar yang dipetik itu akan menghasilkan gelombang stasioner pada ujung terikat. Satu senar pada gitar akan menghasilkan berbagai frekuensi resonansi dari pola gelombang paling sederhana sampai majemuk. Nada yang dihasilkan dengan pola paling sederhana disebut *nada dasar*, kemudian secara berturut-turut pola gelombang yang terbentuk menghasilkan *nada atas ke-1, nada atas ke-2, nada atas ke-3* ... dan seterusnya.

Gambar di samping menggambarkan pola-pola yang terjadi pada sebuah dawai yang kedua ujungnya terikat jika dipetik akan bergetar menghasilkan nada-nada sebagai berikut :

1) Nada Dasar

Jika sepanjang dawai terbentuk $\frac{1}{2}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada dasar*.

ℓ atau $\lambda_0 = 2\ell$ bila frekuensi nada dasar dilambangkan f_0 maka besarnya :

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{2\ell}$$

2) Nada Atas 1

Jika sepanjang dawai terbentuk 1 gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 1.*

$\ell = \lambda_1$ atau $\lambda_1 = \ell$ bila frekuensi nada atas 1 dilambangkan f_1 maka besarnya :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{\ell} = 2\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$

3) Nada Atas 2

Jika sepanjang dawai terbentuk 1,5 gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas* 2.

$\ell = \frac{3}{2}\lambda_2$ atau $\lambda_2 = \frac{2}{3}\ell$ bila frekuensi nada atas 2 dilambangkan f_2 maka besarnya :

$$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{2}{3}\lambda} = \frac{3v}{2\lambda}$$

4) Nada Atas 3

Jika sepanjang dawai terbentuk 2 gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 3.*

$\ell = 2\lambda_3$ atau $\lambda_3 = ½\ell$ bila frekuensi nada atas 3 dilambangkan f_3 maka besarnya :

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{1}{2}\ell} = 2\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$ dan seterusnya.

Berdasarkan data tersebut dapat kita simpulkan bahwa perbandingan frekuensi nada-nada yang dihasilkan oleh sumber bunyi berupa dawai dengan frekuensi nada dasarnya merupakan perbandingan bilangan bulat.

$$f_0 : f_1 : f_2 : f_3 : \ldots = \frac{v}{2\ell} : 2\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 3\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 4\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$
$$= 1 : 2 : 3 : 4 \qquad \ldots(1.14)$$

Contoh Soal

Seutas dawai yang panjangnya 2,5 m, massanya 250 gram diberi tegangan 250 N. Kemudian dipetik sehingga pada dawai tersebut membentuk pola 2,5 gelombang. Tentukan berapa Hz frekuensi nada yang dihasilkan dan nada atas yang ke berapa!

Penyelesaian :

Diketahui : ℓ = 2,5 m
m = 250 gr = 0,250 kg
F = 250 N

Ditanyakan :

a. f = ...? (frekuensi nada yang dihasilkan)
b. Nada atas yang ke berapa yang dihasilkan oleh dawai tersebut?

Jawab :

a. 2,5 λ = 2,5 m
λ = 1 m

$$v = \sqrt{\frac{F.l}{m}} = \sqrt{\frac{250 \times 2,5}{0,250}} = \sqrt{2500} = 50 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{50}{1} = 50 \text{ Hz}$$

Jadi frekuensi nada yang dihasilkan adalah 50 Hz.

b. Karena sepanjang dawai terbentuk 2,5 gelombang maka nada yang dihasilkan adalah nada atas ke-4.

Soal Latihan :

1. Sebuah kawat yang panjangnya 1 m, massanya 100 gr diberi tegangan 1.600 N. Kemudian digetarkan sehingga pada kawat tersebut membentuk pola 2 gelombang. Berapa frekuensi nada yang dihasilkan oleh kawat tersebut?

2. Sebuah kawat yang panjangnya 180 cm, kedua ujungnya diikat kuat-kuat. Cepat rambat gelombang pada kawat tersebut adalah 330 m/s. Bila kawat tersebut dipetik sehingga menghasilkan nada atas ke 2, hitunglah frekuensi nada yang dihasilkan kawat tersebut?

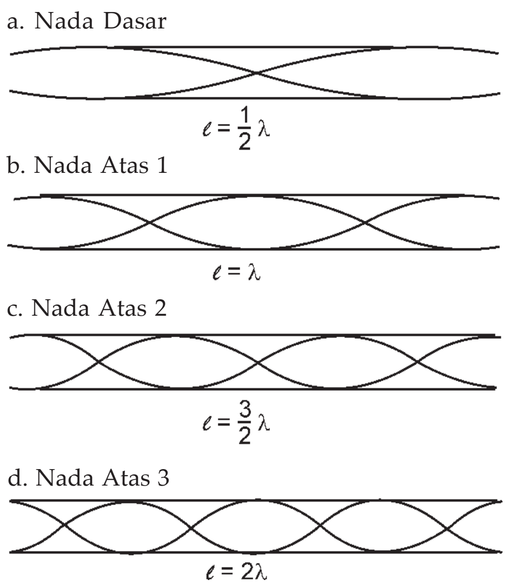
b. Sumber Bunyi Kolom Udara



Gambar 1.17 *Salah satu alat musik tiup. Gelombang naik turun udara bergetar melalui lubang seruling menghasilkan suara yang merdu*

Seruling dan terompet merupakan contoh sumber bunyi berupa kolom udara. Sumber bunyi yang menggunakan kolom udara sebagai sumber getarnya disebut juga *pipa organa*. Pipa organa dibedakan menjadi dua, yaitu *pipa organa terbuka* dan *pipa organa tertutup.*

1) Pipa Organa Terbuka



Gambar 1.18 *Pola gelombang nada-nada pada pipa organa terbuka*

Sebuah pipa organa jika ditiup juga akan menghasilkan frekuensi nada dengan pola-pola gelombang yang dapat dilihat pada **Gambar 1.18**.

a. Nada dasar

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{1}{2}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada dasar.*

$\ell = \frac{1}{2}\lambda_0$ atau $\lambda_0 = 2\ell$ bila frekuensi nada dasar dilambangkan f_0 maka besarnya :

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{2\ell}$$

b. Nada atas 1

Jika sepanjang pipa organa terbentuk 1 gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 1.*

$\ell = \lambda_1$ atau $\lambda_1 = \ell$ bila frekuensi nada atas 1 dilambangkan f_0 maka besarnya :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = 2\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$

c. Nada atas 2

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{3}{2}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 2.*

$\ell = \frac{3}{2}\ \ell_2$ atau $l_2 = \frac{2}{3}\ \ell$ bila frekuensi nada atas 2 dilambangkan f_2 maka besarnya :

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{\frac{2}{3}\ell} = 3\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$

d. Nada atas 3

Jika sepanjang dawai terbentuk 2 gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 3.*

$\ell = 2\lambda_3$ atau $\lambda_3 = \frac{1}{2}\ell$ bila frekuensi nada atas 3 dilambangkan f_3 maka besarnya :

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{1}{2}\ell} = 4\left(\frac{v}{2\ell}\right)$$ ... dan seterusnya.

Berdasarkan data tersebut dapat dikatakan bahwa perbandingan frekuensi nada-nada yang dihasilkan oleh pipa organa terbuka dengan frekuensi nada dasarnya merupakan perbandingan bilangan bulat.

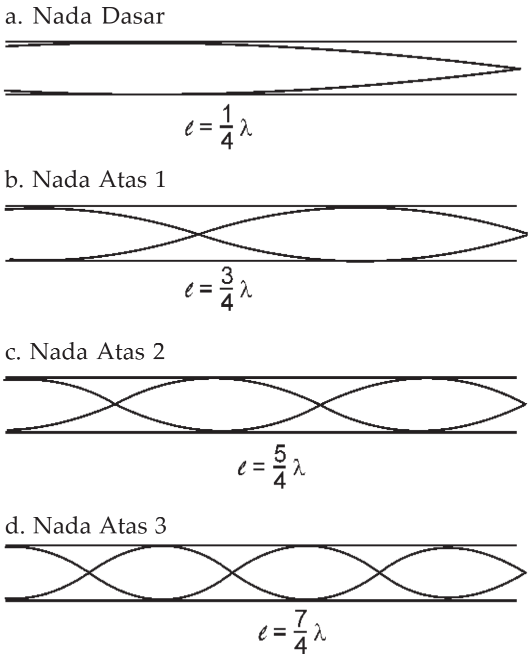
$$f_o : f_1 : f_2 : f_3 : = \frac{v}{2\ell} = 2\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 3\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 4\left(\frac{v}{2\ell}\right) : ....$$
$$= 1 : 2 : 3 : 4 \qquad .... (1.15)$$

2) Pipa Organa Tertutup

Sebuah pipa organa tertutup jika ditiup juga akan menghasilkan frekuensi nada dengan pola-pola gelombang yang dapat dilihat pada **Gambar 1.19.**

a. Nada dasar

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{1}{4}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada dasar.*



Gambar 1.19 *Pola gelombang nada-nada pada pipa organa tertutup*

$\ell = \frac{1}{4}\lambda_0$ atau $\lambda_0 = 4\ \ell$ bila frekuensi nada dasar dilambangkan f_0 maka besarnya : $f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{v}{4\ell}$

b. Nada atas 1

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{3}{4}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 1.*

$\ell = \frac{3}{4}\lambda_1$ atau $\lambda_1 = \frac{4}{3}\ell$ bila frekuensi nada dasar dilambangkan f_1 maka besarnya :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{\frac{4}{3}\ell} = 3\left(\frac{v}{4\ell}\right)$$

c. Nada atas 2

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{5}{4}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 2.*

$\ell = \frac{5}{4}\lambda_2$ atau $\lambda = \frac{4}{5}\ell$ bila frekuensi nada dasar dilambangkan f_2 maka besarnya : $f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{\frac{4}{5}\ell} = 5\left(\frac{v}{4\ell}\right)$

d. Nada atas 3

Jika sepanjang pipa organa terbentuk $\frac{7}{4}$ gelombang, maka nada yang dihasilkan disebut *nada atas 3.*

$\ell = \frac{7}{4}\lambda_3$ atau $\lambda_3 = \frac{4}{7}\ell$ bila frekuensi nada atas 3 dilambangkan f_3 maka besarnya :

$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{4}{7}\ell} = 7\left(\frac{v}{4\ell}\right)$ dan seterusnya.

Dari data tersebut dapat dikatakan bahwa perbandingan frekuensi nada-nada yang dihasilkan oleh pipa organa tertutup dengan frekuensi nada dasarnya merupakan perbandingan bilangan ganjil.

$$f_0 : f_1 : f_2 : f_3 : = \frac{v}{4\ell} : \frac{3v}{4\ell} : \frac{5v}{4\ell} : \frac{7v}{4\ell} : ....$$
$$= 1 : 3 : 5 : 7 : ... \quad .... (1.\ 16)$$

Contoh Soal

Nada atas pertama pipa organa terbuka beresonansi dengan nada atas keempat pipa organa tertutup. Jika panjang pipa organa terbuka tersebut 90 cm. Tentukan berapa panjang pipa organa tertutupnya! (Resonansi adalah peristiwa ikut bergetarnya sumber bunyi karena pengaruh sumber bunyi lain yang bergetar di dekatnya yang disebabkan kedua sumber bunyi mempunyai frekuensi yang sama).

Penyelesaian:

Diketahui : $\ell_{TB} = 90$ cm

$f_{1TB} = f_{4TT}$

Ditanyakan : ℓ_{TT} = ... ?

Jawab : $f_{1TB} = f_{4TT}$

$$\frac{v}{\ell_{TB}} = \frac{9v}{4\ell_{TT}}$$

$$4\ \ell_{TT} = 9\ \ell_{TB}$$

$$\ell_{TT} = \frac{4}{9}\ \ell_{TB} = \frac{4}{9} \times 90 = 40 \text{ cm}$$

Jadi, panjang pipa organa tertutup adalah 40 cm.

Latihan Soal :

1. Nada dasar yang dihasilkan oleh sebuah pipa organa terbuka adalah sama dengan nada atas kedua yang dihasilkan oleh sebuah dawai. Tentukan berapa perbandingan antara panjang pipa organa dengan panjang dawai!

2. Nada atas ke-3 pipa organa terbuka tepat sama dengan nada atas ke-2 dari pipa organa tertutup. Bila panjang pipa organa tertutup adalah 50 cm. Tentukan berapa panjang pipa organa terbukanya!

2. Intensitas dan Taraf Intensitas Bunyi

Pada dasarnya gelombang bunyi adalah rambatan energi yang berasal dari sumber bunyi yang merambat ke segala arah, sehingga muka gelombangnya berbentuk bola. Energi gelombang bunyi yang menembus permukaan bidang tiap satu satuan luas tiap detiknya disebut *intensitas bunyi*. Apabila suatu sumber bunyi mempunyai daya sebesar P watt, maka besarnya intensitas bunyi di suatu tempat yang berjarak r dari sumber bunyi dapat dinyatakan :

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} \qquad \text{.... (1. 17)}$$

dengan :

I = intensitas bunyi (watt/m^2)

P = daya sumber bunyi (watt, joule/s)

A = luas permukaan yang ditembus gelombang bunyi (m^2)

r = jarak tempat dari sumber bunyi (m)

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa intensitas bunyi di suatu tempat berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya, makin jauh dari sumber bunyi, maka intensitasnya semakin kecil. Jika titik A berjarak r_1 dan titik B berjarak r_2 dari sumber bunyi, maka perbandingan intensitas bunyi antara titik A dan B dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \qquad \text{.... (1.18)}$$

Dikarenakan pendengaran telinga manusia mempunyai keterbatasan, maka para ahli menggunakan istilah dalam intensitas bunyi dengan menggunakan ambang pendengaran dan ambang perasaan. *Intensitas ambang pendengaran* (*Io*) yaitu intensitas bunyi terkecil yang masih mampu didengar oleh telinga, sedangkan *intensitas ambang perasaan* yaitu intensitas bunyi yang terbesar yang masih dapat didengar telinga tanpa menimbulkan rasa sakit. Besarnya ambang pendengaran berkisar pada 10^{-12} watt/m^2 dan besarnya ambang perasaan berkisar pada 1 watt/m^2.

Berdasarkan hasil penelitian para ahli ternyata bahwa daya pendengaran telinga manusia terhadap gelombang bunyi bersifat logaritmis, sehingga para ilmuwan menyatakan mengukur intensitas bunyi tidak dalam watt/m^2 melainkan dalam satuan dB (desi bell) yang menyatakan *Taraf Intensitas bunyi (TI)*. Taraf intensitas bunyi merupakan perbandingan nilai logaritma antara intensitas bunyi yang diukur dengan intensitas ambang pendengaran (*Io*) yang dituliskan dalam persamaan :

$$TI = 10 \frac{\log I}{\log I_o} \qquad \text{.... (1.19)}$$

dengan :

TI = taraf intensitas bunyi (dB = desi bell)

I = intesitas bunyi (watt.m^{-2})

Io = intensitas ambang pendengaran (Io = 10^{-12} watt.m^{-2})

Tabel 1.1 Taraf Intensitas dari Berbagai Sumber Bunyi

No.	Sumber Bunyi	TI (dB)
1.	Ambang pendengaran	0
2.	Bisik-bisik	10 - 20
3.	Perpustakaan	30 - 40
4.	Rumah tinggal	50 - 60
5.	Percakapan pada umumnya	60 - 70
6.	Lalu lintas ramai	70 - 80
7.	Suara sepeda motor dengan knalpot terbuka	90 - 100
8.	Senjata mesin	120 - 130
9.	Pesawat jet tinggal landas	130 - 150

Contoh Soal

Suatu sumber bunyi dengan daya 12,56 watt memancarkan gelombang bunyi berupa gelombang speris. Intensitas ambang pendengaran 10^{-12} watt/m^2. Tentukan taraf intensitas bunyi pada jarak 100 meter dari sumber bunyi!

Penyelesaian:

Diketahui : P = 12,56 watt

$I_o = 10^{-12}$ watt.m^{-2}

r = 100 m

Ditanyakan : TI = ...?

Jawab : $TI = 10\ \dfrac{\log I}{\log I_0} = 10\ \dfrac{I}{I_0}$

Intensitas bunyi pada jarak 100 m dari sumber bunyi

adalah : $I = \dfrac{P}{A} = \dfrac{P}{4\pi r^2} = \dfrac{12,56}{4 \times 3,14 \times (100)^2} = 10^{-4}$ watt.m^{-2}

$TI = 10 \log \dfrac{10^{-4}}{10^{-12}} = 10 \log 10^8 = 10 \times 8 = 80$ dB

Jadi, taraf intensitas bunyinya adalah 80 dB.

Soal Latihan :

1. Taraf intensitas bunyi pada suatu tempat yang berjarak 1m dari sumber bunyi adalah 60 dB. Jika harga ambang bunyi 10^{-16} watt.m^{-2}. Tentukan berapa dB taraf intensitas bunyi di tempat yang berjarak 100 meter dari sumber bunyi!
2. Taraf intensitas sebuah mesin ketik adalah 40 dB, tentukan berapa taraf intensitas yang ditimbulkan oleh 100 mesin ketik yang dipakai secara bersamaan!

3. Layangan Bunyi

Bunyi termasuk sebagai gelombang dan sebagai salah satu sifat gelombang yaitu dapat berinterferensi, demikian juga pada bunyi juga mengalami interferensi. Peristiwa interferensi dapat terjadi bila dua buah gelombang bunyi memiliki frekuensi yang sama atau berbeda sedikit dan berada dalam satu ruang dengan arah yang berlawanan. Interferensi semacam ini sering disebut *interferensi ruang*. Interferensi dapat

juga terjadi jika dua gelombang bunyi yang mempunyai frekuensi sama atau berbeda sedikit yang merambat dalam arah yang sama, interferensi yang terjadi disebut *interferensi waktu*.

Dalam peristiwa interferensi gelombang bunyi yang berasal dari dua sumber bunyi yang memiliki frekuensi yang berbeda sedikit, misalnya frekuensinya f_1 dan f_2, maka akibat dari interferensi gelombang bunyi tersebut akan kita dengar bunyi keras dan lemah yang berulang secara periodik. Terjadinya pengerasan bunyi dan pelemahan bunyi tersebut adalah efek dari interferensi gelombang bunyi yang disebut dengan istilah *layangan bunyi* atau *pelayangan bunyi*. Kuat dan lemahnya bunyi yang terdengar tergantung pada besar kecil amplitudo gelombang bunyi. Demikian juga kuat dan lemahnya pelayangan bunyi bergantung pada amplitudo gelombang bunyi yang berinterferensi.

Banyaknya pelemahan dan penguatan bunyi yang terjadi dalam satu detik disebut *frekuensi layangan bunyi* yang besarnya sama dengan selisih antara dua gelombang bunyi yang berinterferensi tersebut. Besarnya frekuensi layangan bunyi dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$f_n = N = | f_1 - f_2 | \quad \text{.... (1.20)}$$

dengan :

f_n = frekuensi layangan bunyi
N = banyaknya layangan bunyi tiap detiknya
f_1 dan f_2 = frekuensi gelombang bunyi yang berinterferensi

Contoh Soal

Pipa organa terbuka panjangnya 40 cm, menghasilkan nada dasar dan membuat layangan bunyi dengan garputala yang frekuensinya 420 Hz. Apabila cepat rambat bunyi di udara 340 m/s. Tentukan berapa banyaknya layangan bunyi tiap detiknya!

Penyelesaian:

Diketahui : ℓ = 40 cm
fg = 420 Hz
v = 340 m/s

Ditanyakan : N = ...?

Jawab : $f_n = N = | f_p - f_g |$

$$fp = \frac{v}{2\lambda} = \frac{340}{2.0,4} = \frac{340}{0,8} = 425 \text{ Hz}$$

Jadi, banyaknya layangan bunyi tiap detiknya

$= N = 425 - 420 = 5$ layangan bunyi.

Life Skills : Kecakapan Akademik

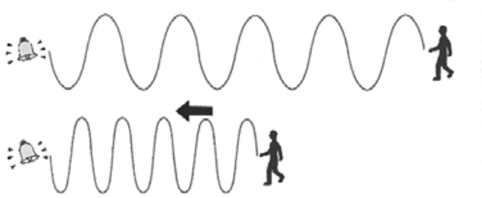
Seorang anak diam di pinggir jalan. Pada saat itu dari samping kiri bergerak mobil ambulan dengan kecepatan 72 km/jam sambil membunyikan sirine yang frekuensinya 1.000 Hz dan dari sebelah kanan bergerak sebuah bis dengan kecepatan 54 km/jam sambil membunyikan klaksonnya yang mempunyai frekuensi 1000 Hz. Apabila pada saat itu kecepatan bunyi di udara 340 m/s dan udara di sekitar dianggap tenang, tentukan berapa frekuensi layangan bunyi yang didengar anak tersebut! Hasilnya dikumpulkan pada guru fisika kalian!

4. Efek Doppler

Info Sains

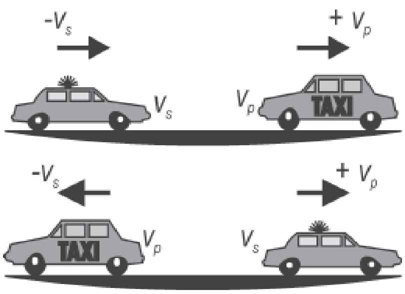
Membayangkan Efek Doppler

Cara lain untuk memikirkan efek Doppler ialah membayangkan seorang pendengar yang berjalan mendekati sumber bunyi. Semakin dekat ia mendatangi lonceng, semakin cepat muka-muka gelombang mencapainya, dan semakin tinggi nada bunyi lonceng itu dalam pendengarannya.



Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering menjumpai bunyi yang kita dengar akan terdengar berbeda apabila antara sumber bunyi dan pendengar terjadi gerakan relatif. Misalnya pada saat kita menaiki sepeda motor di jalan raya berpapasan dengan mobil ambulan atau mobil patroli yang membunyikan sirine. Bunyi sirine yang terdengar akan makin keras saat kita bergerak saling mendekati dan akan semakin lemah pada saat kita bergerak saling menjauhinya. Peristiwa ini disebut *efek Doppler* yaitu peristiwa terjadinya perubahan frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar akan berubah jika terjadi gerakan relatif antara sumber bunyi dan pendengar.

Keras dan lemahnya bunyi yang terdengar bergantung pada frekuensi yang diterima pendengar. Besar kecil perubahan frekuensi yang terjadi bergantung pada cepat rambat gelombang bunyi dan perubahan kecepatan relatif antara pendengar dan sumber bunyi. Peristiwa ini pertama kali dikemukakan oleh **Christian Johann Doppler** pada tahun 1942 dan secara eksperimen dilakukan oleh **Buys Ballot** pada tahun 1945.



Sebagai contoh sumber bunyi mengeluarkan bunyi dengan frekuensi f_s dan bergerak dengan kecepatan v_s dan pendengar bergerak dengan kecepatan v_p dan kecepatan rambat gelombang bunyi adalah v maka frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar apabila terjadi gerakan relatif antara sumber bunyi dengan pendengar dapat dirumuskan :

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \times f_s \qquad \text{.... (1.21)}$$

dengan :

f_p = frekuensi bunyi yang diterima pendengar (Hz)

f_s = frekuensi sumber bunyi (Hz)

v = cepat rambat bunyi di udara (ms^{1})

v_p = kecepatan pendengar (ms^{1})

v_s = kecepatan sumber bunyi (ms^{1})

Aturan penulisan kecepatan :

- v_p berharga positif jika pendengar bergerak mendekati sumber bunyi dan sebaliknya v_p berharga negatif jika pendengar bergerak menjauhi sumber bunyi.
- v_s berharga positif jika sumber bunyi menjauhi pendengar dan sebaliknya berharga negatif jika sumber bunyi bergerak mendekati pendengar.

Contoh Soal

Sebuah mobil patroli polisi bergerak dengan kelajuan 72 km/jam sambil membunyikan sirine yang mempunyai frekuensi 800 Hz. Tentukan berapa frekuensi bunyi sirine yang diterima oleh seseorang yang diam di pinggir jalan pada saat mobil tersebut bergerak mendekatinya! Apabila diketahui cepat rambat gelombang bunyi di udara 340 m/s.

Penyelesaian:

Diketahui : v_s = 72 km/jam = 20 m/s

f_s = 800 Hz

v_p = 0

v = 340 m/s

Ditanyakan : f_p = ?

Jawab : $f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \times f_s$

$$= \frac{340}{340 - 20} \times 800 = 850 \text{ Hz}$$

Jadi, frekuensi bunyi sirine yang diterima pendengar adalah 850 Hz.

Soal Latihan :

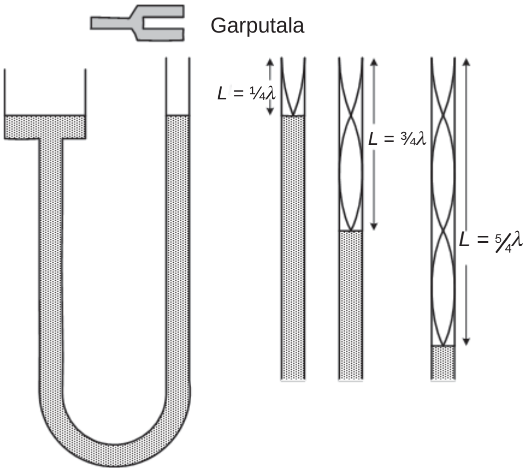
1. Sebuah mobil ambulan bergerak dengan kelajuan 54 km/jam sambil membunyikan sirine yang memiliki frekuensi 1000 Hz, berpapasan dengan seorang pengendara sepeda motor yang bergerak dalam arah berlawanan dengan kelajuan 36 km/jam. Apabila cepat rambat bunyi di udara saat itu 340 m/s tentukan berapa frekuensi bunyi sirine yang diterima pengendara sepeda motor pada saat (a) saling mendekati dan (b) saling menjauhi!
2. Seorang pilot pesawat terbang bergerak mendekati bandara. Apabila pilot tersebut mendengar bunyi sirine yang dipancarkan oleh menara pengawas dengan frekuensi 2000 Hz, dan cepat rambat gelombang bunyi di udara 340 m/s, frekuensi sumber bunyi (sirine) 1700 Hz. Berapa km/jam kelajuan pesawat tersebut?

5. Mengukur Cepat Rambat Bunyi

Bagaimana cara mengukur cepat rambat gelombang bunyi di udara? Mengukur cepat rambat gelombang bunyi dapat dilakukan dengan metode resonansi pada tabung resonator (kolom udara). Pengukuran menggunakan peralatan yang terdiri atas tabung kaca yang panjangnya 1 meter, sebuah slang karet/plastik, jerigen (tempat air) dan garputala seperti terlihat dalam **Gambar 1.20.**

Bagaimana prinsip kerja alat ini? Mula-mula diatur sedemikian, permukaan air tepat memenuhi pipa dengan jalan menurunkan jerigen. Sebuah garputala digetarkan dengan cara dipukul menggunakan pemukul dari karet dan diletakkan di atas bibir tabung kaca, tetapi tidak menyentuh bibir tabung dan secara perlahan-lahan tempat air kita turunkan. Lama-kelamaan akan terdengar bunyi yang makin lama makin keras dan akhirnya terdengar paling keras yang pertama. Jika jerigen

terus kita turunkan perlahan-lahan (dengan garputala masih bergetar dengan jalan setiap berhenti dipukul lagi), maka bunyi akan melemah dan tak terdengar, tetapi semakin lama akan terdengar makin keras kembali. *Apa yang menyebabkan terdengar bunyi keras tersebut?*



Gambar 1.20 *Percobaan resonansi*

Resonansi I jika :

$L_1 = \frac{1}{4}\lambda$ atau $\lambda = 4\,L_1$

Resonansi II jika :

$L_2 = \frac{3}{4}\lambda$ atau $\lambda = \frac{4}{3}L_2$

Resonansi ke III jika :

$L_3 = \frac{5}{4}\lambda$ atau $\lambda = \frac{4}{5}L_3$

Atau λ dapat dicari dengan

$\lambda = 2\,(L_2 - L_1) = (L_3 - L_1)$

Gelombang yang dihasilkan garputala tersebut merambat pada kolom udara dalam tabung dan mengenai permukaan air dalam tabung, kemudian dipantulkan kembali ke atas. Kedua gelombang ini akan saling berinterferensi. Apabila kedua gelombang bertemu pada fase yang sama akan terjadi interferensi yang saling memperkuat, sehingga pada saat itu pada kolom udara timbul gelombang stasioner dan frekuensi getaran udara sama dengan frekuensi garputala. Peristiwa inilah yang disebut *resonansi*. Sebagai akibat resonansi inilah terdengar bunyi yang keras. Resonansi pertama terjadi jika panjang kolom udara sebesar $\frac{1}{4}\lambda$, peristiwa resonansi kedua terjadi jika panjang kolom udara $\frac{3}{4}\lambda$, ketiga jika $\frac{5}{4}\lambda$ dan seterusnya. Dengan mengukur panjang kolom udara saat terjadi resonansi, maka panjang gelombang bunyi dapat dihitung. Oleh karena itu, cepat rambat gelombang bunyi dapat dicari dengan persamaan :

$$v = f \times \lambda \qquad \text{.... (1.22)}$$

dengan :

v = cepat rambat gelombang bunyi (m/s)

f = frekuensi garputala (Hz)

λ = panjang gelombang bunyi (m)

Contoh Soal

Pada percobaan resonansi dipakai garpu tala yang frekuensinya 512 Hz. Resonansi yang pertama terjadi saat panjang kolom udaranya 16 cm dan resonansi yang kedua terjadi pada saat panjang kolom udaranya 48 cm. Tentukan berapa kecepatan rambat gelombang bunyi pada saat itu!

Penyelesaian:

Diketahui : f = 512 Hz

L_1 = 16 cm

L_2 = 48 cm

Ditanyakan : v = …….. ?

Jawab : $v = f \times \lambda$

$\lambda = 2\ (L_2 - L_1)$

$= 2\ (48 - 16)$

$= 2\ (32) = 64$ cm $= 0{,}66$ m

$v = 512 \times 0{,}66 = 338\ \text{ms}^{1}$

Jadi, cepat rambat gelombang bunyinya adalah 338 ms^{1}.

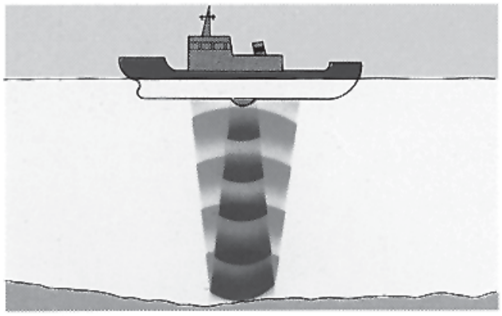
Soal Latihan :

Pada percobaan resonansi, terjadi resonansi yang pertama pada saat panjang kolom udaranya 20 cm dan resonansi yang kedua terjadi pada saat panjang kolom udaranya 60 cm. Jika laju bunyi di udara saat itu 300 m/s , tentukan frekuensi garputala yang digunakan!

Wawasan Produktivitas : Etos Kerja

Dengan menggunakan prinsip efek Doppler sekarang ini dapat digunakan untuk menghitung kecepatan gerak suatu benda misalnya pesawat terbang atau gerak benda angkasa luar atau planet. Cobalah kamu cari bagaimana cara pengukuran gerak planet menggunakan prinsip efek Doppler melalui internet, majalah, buku-buku literatur yang lain dan tuliskan hasilnya dan kumpulkan pada guru fisika di kelasmu!

F. Penerapan Gelombang Bunyi dalam Teknologi



Sumber : Hamparan Dunia Ilmu "Energi dan Fisika"

***Gambar 1.21** Sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut.*

Dalam perkembangan dunia pengetahuan sekarang ini, gelombang bunyi dapat dimanfaatkan dalam berbagai keperluan penelitian. Di bidang kelautan misalnya untuk mengukur kedalaman laut, di bidang industri misalnya untuk mengetahui cacat yang terjadi pada benda-benda hasil produksinya, di bidang pertanian untuk meningkatkan kualitas hasil pertanian, dan di bidang kedokteran dapat digunakan untuk terapi adanya penyakit dalam organ tubuh. Untuk keperluan tersebut digunakan suatu alat yang bekerja berdasarkan prinsip pemantulan gelombang bunyi yang disebut SONAR (*Sound Navigation Ranging*).

Prinsip kerja SONAR berdasarkan prinsip pemantulan gelombang ultrasonik. Alat ini diperkenalkan pertama kali oleh **Paul Langenvin**, seorang ilmuwan dari Prancis pada tahun 1914. Pada saat itu Paul dan pembantunya membuat alat yang dapat mengirim pancaran kuat gelombang bunyi berfrekuensi tinggi *(ultrasonik)* melalui air. Pada dasarnya SONAR memiliki dua bagian alat yang memancarkan gelombang ultrasonik yang disebut *transmiter (emiter*) dan alat yang dapat mendeteksi datangnya gelombang pantul (gema) yang disebut *sensor (reciver)*.

Gelombang ultrasonik dipancarkan oleh *transmiter* (pemancar) yang diarahkan ke sasaran, kemudian akan dipantulkan kembali dan ditangkap oleh pesawat penerima *(reciver)*. Dengan mengukur waktu yang diperlukan dari gelombang dipancarkan sampai gelombang diterima lagi, maka dapat diketahui jarak yang ditentukan. Untuk mengukur kedalaman laut, SONAR diletakkan di bawah kapal.

Dengan pancaran ultrasonik diarahkan lurus ke dasar laut, dalamnya air dapat dihitung dari panjang waktu antara pancaran yang turun dan naik setelah digemakan. Apabila cepat rambat gelombang bunyi di udara v, selang waktu antara gelombang dipancarkan dengan gelombang pantul datang adalah Δt, indeks bias air n, dan kedalaman laut adalah d maka kedalaman laut tersebut dapat dicari dengan persamaan :

$$d = \frac{v.\Delta t}{2n} \quad .... (1.\ 23)$$

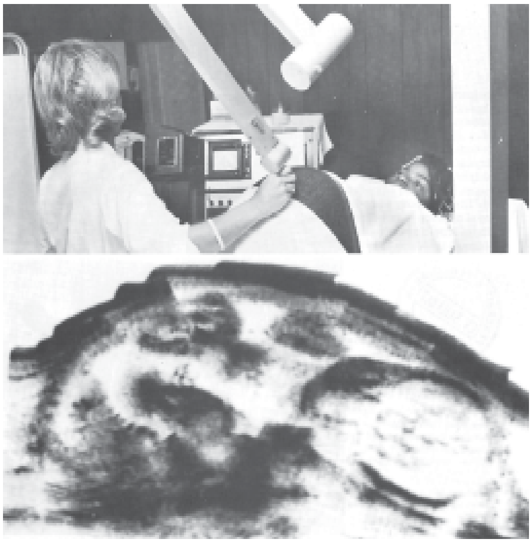
dengan :

d = jarak yang diukur (m)

Δt = waktu yang diperlukan gelombang dari dipancarkan sampai diterima kembali (s)

v = kecepatan rambat gelombang ultrasonik (m/s)

n = indeks bias medium



Sumber : Ilmu Pengetahuan Populer 5

Gambar 1.22 *Ultrasonografi digunakan untuk melihat perkembangan janin dalam kandungan.*

Selanjutnya dalam perkembangannya, penggunaan gelombang ultrasonik dalam pelayaran digunakan sebagai navigator. Pada mesin cuci, getaran utrasonik yang kuat dapat menggugurkan ikatan antarpartikel kotoran dan menggetarkan debu yang melekat pada pakaian sehingga lepas. Di sekitar lapangan udara (bandara), getaran gelombang ultrasonik yang kuat dapat membuyarkan kabut. Dalam bidang kedokteran, getaran gelombang ultrasonik yang berenergi rendah dapat digunakan untuk mendeteksi/ menemukan penyakit yang berbahaya di dalam organ tubuh, misalnya di jantung, payudara, hati, otak, ginjal, dan beberapa organ lain. Pengamatan ultrasonik pada wanita hamil untuk melihat perkembangan janin dalam uterus dengan menggunakan *ultrasonografi*. Dengan menggunakan ultrasonik yang berenergi tinggi dapat digunakan sebagai pisau bedah, yang pada umumnya untuk melakukan pembedahan dalam neurologi dan otologi.

Di bidang pertanian, ultrasonik berenergi rendah digunakan untuk meningkatkan hasil pertanian, misalnya penyinaran biji atau benih dengan menggunakan ultrasonik dapat menghasilkan pertumbuhan yang lebih cepat dari biasanya, tanaman kentang yang dirawat dengan radiasi ultrasonik dapat meningkat produksi panennya.

Wawasan Kontekstual

Dari berbagai alat musik yang terdapat di sekeliling kita dapat kita kelompokkan berdasarkan sumber getarnya. Cobalah sebutkan masing-masing tiga contoh alat-alat musik yang sumber getarnya berupa :

a. kolom udara
b. senar/dawai
c. membran
d. plat/lempengan

Seputar Tokoh



Christian Huygens

Christian Huygens dilahirkan pada tanggal 14 April 1629. Pada mulanya ia adalah seorang sarjana ilmu pasti dari Belanda, namun kemudian mendalami fisika dalam bidang mekanika dan optik. Huygens aktif menyelidiki gerak jatuh, konstruksi jam bandul, lensa, dan banyak mengemukakan teori cahaya sebagai gelombang. Dialah yang mengemukakan bahwa tiap titik pada permukaan gelombang dapat dianggap sebagai sumber gelombang yang dapat mengeluarkan gelombang baru. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Gelombang adalah rambatan energi getaran.
2. Gelombang mekanik yaitu gelombang yang merambat memerlukan medium/zat perantara.
3. Gelombang elektromagnetik yaitu gelombang yang merambat tanpa memerlukan medium/zat perantara.
4. Gelombang transversal yaitu gelombang yang arah rambatannya tegak lurus arah getarannya.
5. Gelombang longitudinal yaitu gelombang yang arah rambatannya sejajar arah getarannya.
6. Persamaan gelombang berjalan

   $Y = A \sin (wt \pm kx)$

7. Persamaan gelombang stasioner pada ujung bebas :

   $Y = 2A \cos kx \sin wt$

   Letak kedudukan simpul-simpul dari ujung bebas $Xs = (2n - 1)\frac{1}{4} l$

   Letak kedudukan perut-perut dari ujung bebas $Xp = (n - 1)\frac{1}{2} l$

8. Persamaan gelombang stasioner pada ujung terikat :

   $Y = 2A \sin kx \cos wt$

   Letak kedudukan simpul-simpul dari ujung bebas $Xs = (n - 1)\frac{1}{2} l$

   Letak kedudukan perut-perut dari ujung bebas $Xp = (2n - 1)\frac{1}{4} l$

9. Untuk mengukur cepat rambat gelombang pada dawai dapat dilakukan dengan percobaan Melde yang dituliskan dalam persamaan

   $$v = \sqrt{\frac{F\ell}{m}} = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$$

10. Sumber bunyi adalah benda yang bergetar. Sumber bunyi dapat berupa plat getar, dawai tali, atau kolom udara, seperti pada harmonika, gitar, dan seruling.

11. Frekuensi nada-nada yang dihasilkan oleh sumber bunyi yang berupa dawai/tali dengan frekuensi nada dasarnya merupakan perbandingan bilangan bulat.

    $$f_1 : f_1 : f_2 : f_3 : \ldots = \frac{v}{2\ell} : 2\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 3\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 4\left(\frac{v}{2\ell}\right) = 1 : 2 : 3 : 4 : \ldots$$

12. Frekuensi nada-nada yang dihasilkan oleh pipa organa terbuka dengan frekuensi nada dasarnya merupakan perbandingan bilangan bulat.

    $$f_1 : f_1 : f_2 : f_3 : \ldots = \frac{v}{2\ell} : 2\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 3\left(\frac{v}{2\ell}\right) : 4\left(\frac{v}{2\ell}\right) = 1 : 2 : 3 : 4 : \ldots$$

13. Intensitas bunyi yaitu besarnya energi bunyi yang menembus permukaan bidang tiap satu satuan luas tiap detiknya.

14. Ambang pendengaran yaitu intensitas bunyi terkecil yang masih dapat didengar oleh telinga manusia. Besarnya ambang pendengaran sebesar 10^{-12} Watt/m^2.

15. Ambang perasaan yaitu intensitas bunyi terbesar yang masih dapat didengar telinga manusia tanpa menimbulkan rasa sakit, besarnya ambang perasaan sebesar 1 Watt/m^2.

16. Taraf intensitas bunyi yaitu perbandingan logaritma antara intensitas bunyi dengan ambang pendengaran yang dinyatakan dalam persamaan $TI = 10 \frac{\log I}{\log I_o}$

17. Layangan bunyi yaitu peristiwa terdengarnya keras lemahnya bunyi yang diakibatkan interferensi antara dua gelombang bunyi yang mempunyai frekuensi yang berbeda sedikit. Frekuensi layangan bunyi yaitu banyaknya layangan bunyi yang tejadi tiap sekonnya. Dinyatakan dalam persamaan : $fn = |f1 - f2|$
18. Effek Doppler yaitu peristiwa perubahan frekuensi bunyi yang terdengar oleh pendengar apabila terjadi gerak relatif antara sumber bunyi dengan pendengar.

Frekuensi bunyi akan terdengar lebih tinggi jika antara sumber bunyi dengan pendengar bergerak saling mendekati atau pendengar diam sumber bunyi bergerak mendekati pendengar atau sebaliknya. Sedangkan frekuensi bunyi akan terdengar lebih rendah jika antara sumber bunyi dengan pendengar bergerak saling menjauhi atau pendengar diam sumber bunyi bergerak menjauhi pendengar atau sebaliknya. Effek Doppler dirumuskan :

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \times f_s$$

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Sebuah gelombang transversal dengan persamaan $y = 5.\sin \pi \left(\frac{8t - x}{2}\right)$ meter. Cepat rambat gelombang tersebut adalah ....
   A. 2 ms^{-1}
   B. 4 ms^{-1}
   C. 8 ms^{-1}
   D. 16 ms^{-1}
   E. 32 ms^{-1}

2. Persamaan sebuah gelombang yang berjalan pada seutas tali adalah $y = 10 \sin 2\pi (t - 2x)$ setelah 2 detik; titik-titik yang mempunyai simpangan 5 cm antara lain pada x sama dengan ....
   A. $\frac{1}{12}$ m
   B. $\frac{2}{12}$ m
   C. $\frac{3}{12}$ m
   D. $\frac{10}{12}$ m
   E. $\frac{11}{12}$ m

3. Sebuah tali panjangnya 80 cm diberi tegangan, jika cepat rambat gelombang pada tali itu 720 m/s. Besarnya frekuensi nada dasar yang ditimbulkan oleh tali itu adalah ....
   A. 240 Hz
   B. 360 Hz
   C. 450 Hz
   D. 500 Hz
   E. 750 Hz

4. Kecepatan gelombang transversal dalam dawai adalah:
   1. berbanding lurus dengan akar gaya tegangan dawai
   2. berbanding terbalik dengan akar massa panjang dawai
   3. berbanding terbalik dengan panjang gelombang dalam dawai
   4. berbanding terbalik dengan frekuensi gelombang dalam dawai

   Yang benar adalah pernyataan ....
   A. 1, 2, 3 dan 4
   B. 1, 2, dan 3
   C. 1 dan 2
   D. 2 dan 4
   E. 4 saja
5. Seutas senar yang panjangnya 0,4 m dan massanya 2.10^{-3} kg diikat pada salah satu garputala yang merambat 300 getaran detik^{-1}. Tegangan yang harus diberikan agar terjadi $\frac{3}{2}$ gelombang adalah ....
   A. 4 N
   B. 8 N
   C. 12 N
   D. 16 N
   E. 32 N
6. Dua buah pipa organa terbuka A dan B ditiup bersama-sama. Pipa A menghasilkan nada dasar yang sama tinggi dengan nada atas kedua pipa B. Perbandingan panjang pipa organa A dengan pipa organa B adalah ....
   A. 1 : 3
   B. 3 : 1
   C. 1 : 2
   D. 2 : 2
   E. 2 : 3
7. Jarak A ke sumber bunyi adalah 3 kali jarak B ke sumber bunyi. Intensitas bunyi yang diterima A dibandingkan dengan intensitas bunyi yang diterima B adalah ....
   A. 1 : 2
   B. 3 : 1
   C. 1 : 3
   D. 9 : 1
   E. 1 : 9

8. Sebuah sirine rata-rata menimbulkan taraf intensitas 100 dB. Berapa taraf intensitas yang ditimbulkan oleh 10 buah sirine secara bersamaan?
   A. 105 dB
   B. 110 dB
   C. 115 dB
   D. 120 dB
   E. 130 dB

9. Taraf intensitas bunyi suatu tempat yang berjarak 5 m dari sumber bunyi sebesar 70 dB. Tempat yang berjarak 0,5 m dari sumber bunyi bertaraf intensitas sebesar ....
   A. 9 dB
   B. 80 dB
   C. 90 dB
   D. 100 dB
   E. 110 dB

10. Sebuah gelombang stasioner pada ujung tetap dinyatakan dalam persamaan : $Y = 4 \sin\left(\frac{\pi x}{15}\right) \cos 6\pi t$ cm, maka besarnya simpangan maksimum pada titik yang berjarak x = 5 cm dari ujung tetap adalah ....
   A. 0 cm
   B. 2 cm
   C. $2\sqrt{2}$ cm
   D. $2\sqrt{3}$ cm
   E. 4 cm

B. Kerjakan soal di bawah ini!

1. Jelaskan perbedaan antara gelombang mekanik dengan gelombang elektromagnetik, dan berilah masing-masing tiga contohnya!

2. Suatu gelombang merambat pada tali dinyatakan dalam persamaan $Y = 0{,}1 \sin (20\pi t - 4\pi x)$, jika Y dan x dalam meter dan t dalam sekon. Hitunglah panjang gelombang dan kecepatan gelombang yang merambat pada tali tersebut!

3. Dua buah pipa organa terbuka (A) dan pipa organa tertutup (B) ditiup secara bersamaan sehingga masing-masing menghasilkan nada atas pertama f_A dan f_B. Apabila kedua pipa organa tersebut memiliki panjang yang sama, tentukan perbandingan frekuensi nada yang dihasilkan oleh kedua pipa organa tersebut!
4. Besarnya taraf intensitas suatu tempat yang berjarak 2 meter dari sumber bunyi adalah 60 dB. Tentukan berapa taraf intensitas di tempat yang berjarak 20 cm dari sumber bunyi tersebut!
5. Mobil ambulans bergerak dengan kelajuan 72 km/jam sambil membunyikan sirine yang frekuensinya 1000 Hz dan sebuah bus bergerak berlawanan dengan kelajuan 36 km/jam. Bila kelajuan gelombang bunyi di udara 340 m/s, tentukan berapa frekuensi bunyi sirine yang diterima pengemudi bus pada saat : (a) bergerak saling mendekati dan (b) bergerak saling menjauhi!

Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, kalian seharusnya memahami tentang :

1. jenis dan sifat-sifat gelombang,
2. gelombang berjalan dan stasioner,
3. gelombang bunyi, dan
4. penerapan gelombang bunyi dalam teknologi.

Apabila ada hal-hal yang belum kalian pahami, pelajari kembali materi ini sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

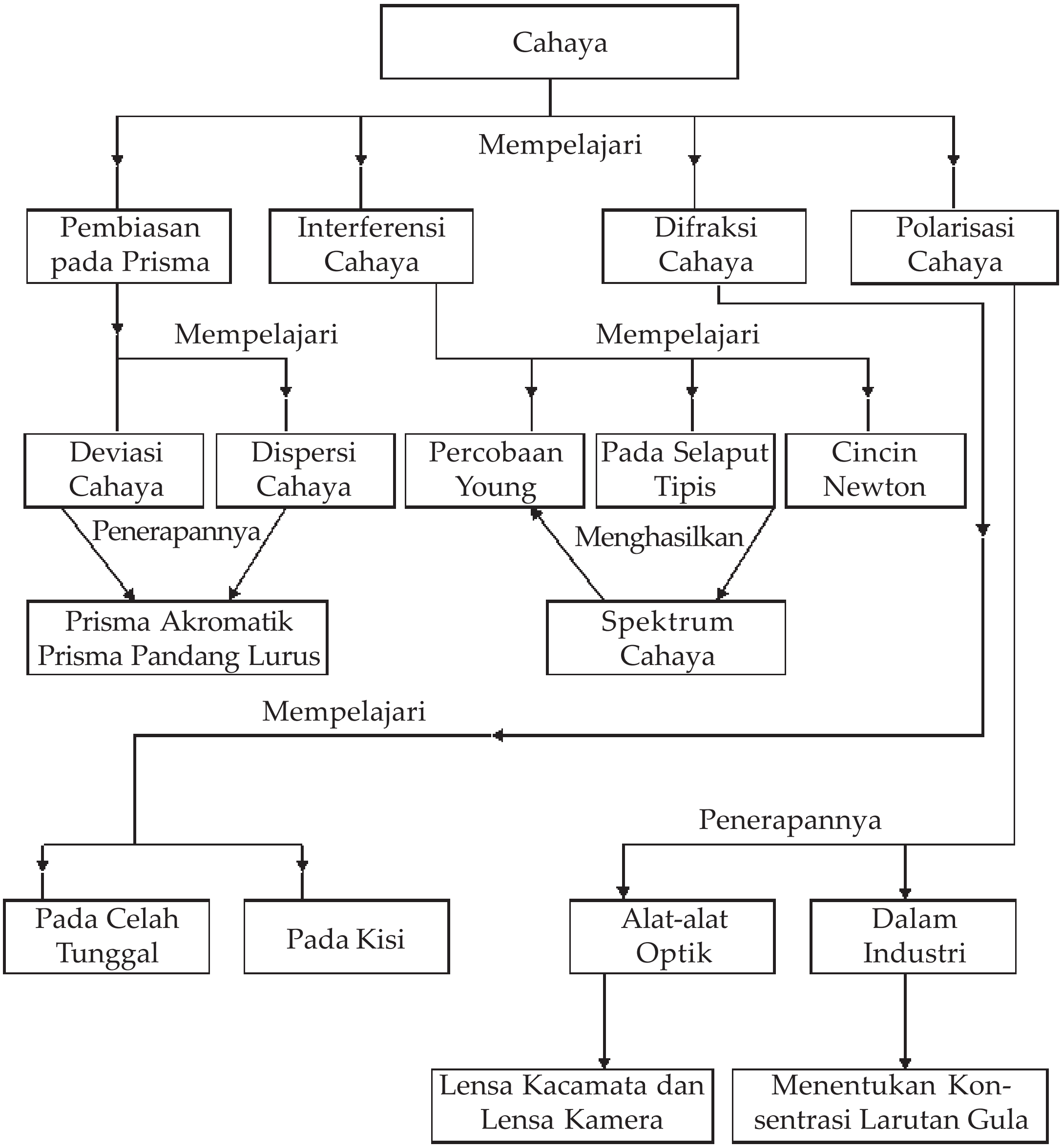
Bab II
Cahaya



Sumber : HDI Cuaca dan Iklim

Pelangi cerah terbentang melengkung di atas air yang mengempas turun di Air Terjun Niagara. Pelangi tersebut terbentuk karena peristiwa dispersi cahaya. Pelangi adalah salah satu contoh dari sifat-sifat cahaya yang mengagumkan, selain dispersi, cahaya dapat juga mengalami interferensi.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu:

1. mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang cahaya, dan
2. menerapkan konsep dan prinsip gelombang cahaya dalam teknologi.

Motivasi Belajar

Sejak zaman purba, adanya pelangi telah menyenangkan dan membingungkan semua orang yang melihatnya. Orang kuno menganggap pelangi sebagai tanda nasib baik. Akan tetapi, berabad-abad kemudian, ilmuwan mulai menyingkap rahasia gejala-gejala misterius tersebut dan menemukan bahwa hal ini merupakan efek dari bahan-bahan yang sangat biasa. Bagaimana hasil penemuan para ahli mengenai hal itu? Agar kalian memahaminya, maka pelajarilah materi bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

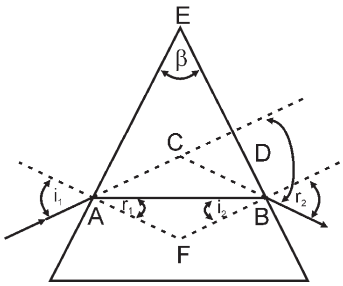
sudut deviasi, dispersi cahaya, interferensi cahaya, difraksi cahaya, polarisasi cahaya, prisma, cincin Newton.

Pada bab I kalian telah mempelajari tentang gelombang dan sifat-sifatnya. Berdasarkan zat perantara, gelombang dibedakan menjadi dua, gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Cahaya merupakan salah satu contoh dari gelombang elektromagnetik, yaitu gelombang yang merambat tanpa memerlukan medium (zat perantara). Gejala dan sifat-sifat gelombang yang telah kita pelajari pada bab I juga terjadi pada cahaya. Pada bab ini, kita akan membahas tentang sifat-sifat cahaya, yaitu pembiasan (*refraksi*), *dispersi*, *interferensi* (perpaduan), *difraksi* (pelenturan), dan *polarisasi*.

A. Pembiasan Cahaya pada Prisma

Prisma adalah zat bening yang dibatasi oleh dua bidang datar. Apabila seberkas sinar datang pada salah satu bidang prisma yang kemudian disebut sebagai bidang pembias I, akan dibiaskan mendekati garis normal. Sampai pada bidang pembias II, berkas sinar tersebut akan dibiaskan menjauhi garis normal. Pada bidang pembias I, sinar dibiaskan mendekati garis normal, sebab sinar datang dari zat optik kurang rapat ke zat optik lebih rapat yaitu dari udara ke kaca. Sebaliknya pada bidang pembias II, sinar dibiaskan menjahui garis normal, sebab sinar datang dari zat optik rapat ke zat optik kurang rapat yaitu dari kaca ke udara. Sehingga seberkas sinar yang melewati sebuah prisma akan mengalami pembelokan arah dari arah semula. Marilah kita mempelajari fenomena yang terjadi jika seberkas cahaya melewati sebuah prisma seperti halnya terjadinya sudut deviasi dan dispersi cahaya.

1. Sudut Deviasi



***Gambar 2.1** Pembiasan cahaya pada prisma*

Gambar 2.1 menggambarkan seberkas cahaya yang melewati sebuah prisma. Gambar tersebut memperlihatkan bahwa berkas sinar tersebut dalam prisma mengalami dua kali pembiasan sehingga antara berkas sinar masuk ke prisma dan berkas sinar keluar dari prisma tidak lagi sejajar. Sudut yang dibentuk antara arah sinar datang dengan arah sinar yang meninggalkan prisma disebut *sudut deviasi* diberi lambang D. Besarnya sudut deviasi tergantung pada sudut datangnya sinar. Perhatikan **Gambar 2.1!**

Untuk segiempat AFBE, maka : $\beta + \angle AFB = 180^o$

Pada segitiga AFB, $r_1 + i_2 + \angle AFB = 180^o$, sehingga diperoleh

$$\beta + \angle AFB = r_1 + i_2 + \angle AFB$$

$$\beta = r_1 + i_2$$

Pada segitiga ABC, terdapat hubungan $\angle ABC + \angle BCA + \angle CAB = 180^o$, di mana $\angle ABC = r_2 - i_2$ dan $\angle CAB = i_1 - r_1$, sehingga $\angle BCA + (r_2 - i_2) + (i_1 - r_1) = 180^o$

$$\angle BCA = 180^o + (r_1 + i_2) - (i_1 + r_2)$$

Besarnya sudut deviasi dapat dicari sebagai berikut.

$$D = 180^o - \angle BCA$$

$$= 180^o - \{(180^o + (r_1 + i_2) - (i_1 + r_2)\}$$

$$= (i_1 + r_2) - (i_2 + r_1)$$

$$D = i_1 + r_2 - \beta \qquad .... (2.1)$$

Keterangan :

D = sudut deviasi

i_1 = sudut datang pada prisma

r_2 = sudut bias sinar meninggalkan prisma

β = sudut pembias prisma

Besarnya sudut deviasi sinar bergantung pada sudut datangnya cahaya ke prisma. Apabila sudut datangnya sinar diperkecil, maka sudut deviasinya pun akan semakin kecil. *Sudut deviasi akan mencapai minimum (D_m) jika sudut datang cahaya ke prisma sama dengan sudut bias cahaya meninggalkan prisma* atau pada saat itu berkas cahaya yang masuk ke prisma akan memotong prisma itu menjadi segitiga sama kaki,

sehingga berlaku $i_1 = r_2 = i$ (dengan i = sudut datang cahaya ke prisma) dan $i_2 = r_1 = r$ (dengan r = sudut bias cahaya memasuki prisma). Karena $\beta = i_2 + r_1 = 2r$ atau $r = \frac{1}{2}\beta$ dengan demikian besarnya sudut deviasi minimum dapat dinyatakan:

$$D = i_1 + r_2 - \beta = 2i - \beta \text{ atau } i = \frac{1}{2}(D_m + \beta)$$

Menurut hukum Snellius tentang pembiasan berlaku

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin \frac{1}{2}(D_m + \beta)}{\sin \frac{1}{2}\beta} = \frac{n_2}{n_1} \text{ atau}$$

$$n_1 \sin \frac{1}{2}(D_m + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2}\beta \quad \text{.... (2.2)}$$

dengan :

n_1 = indeks bias medium di sekitar prisma

n_2 = indeks bias prisma

β = sudut pembias prisma

D_m = sudut deviasi minimum prisma

Untuk sudut pembias prisma kecil ($\beta \leq 15^o$), maka berlaku $\sin \frac{1}{2}(\beta + D_m) = \frac{1}{2}(\beta + D_m)$ dan $\sin \frac{1}{2}\beta = \frac{1}{2}\beta$. Sehingga besarnya sudut deviasi minimumnya dapat dinyatakan :

$$n_1 \sin \frac{1}{2}(D_m + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2}\beta$$

$$n_1 \frac{1}{2}(D_m + \beta) = n_2 \frac{1}{2}\beta$$

$$n_1 (D_m + \beta) = n_2 \beta$$

$$D_m = \frac{(n_2\beta - n_1\beta)}{n_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right)\beta$$

Apabila medium di sekitar prisma berupa udara maka $n_1 = 1$ dan indeks bias prisma dinyatakan dengan n, maka berlaku :

$$D_m = (n - 1)\,\beta \qquad \text{.... (2.3)}$$

Contoh Soal

1. Sebuah prisma mempunyai sudut pembias 60° dan indeks biasnya 1,5. Seberkas sinar datang pada salah satu sisi pembias prisma dengan sudut datang 60°, tentukan :
   a. sudut deviasi yang terjadi pada prisma,
   b. sudut deviasi minimum yang terjadi pada prisma tersebut, dan
   c. sudut deviasi minimum yang terjadi jika prisma di dalam air yang indeks biasnya $\frac{4}{3}$.

   Penyelesaian :

   Diketahui : $n = 1{,}5$
   $\beta = 60^\circ$
   $i = 60^\circ$

   Ditanyakan : a. $D = ...?$
   b. $D_m = ...?$
   c. $D_m = ...?$ (dalam air)

   Jawab :

   a. $D = i_1 + r_2 - \beta$

   $$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = n$$

   $$\sin r_1 = \frac{1}{n} \sin i_1$$

   $$= \frac{1}{1{,}5} \sin 60^\circ = \frac{2}{3} \times \frac{1}{2}\sqrt{3}$$

   $$= \frac{1}{3}\sqrt{3} = 0{,}577$$

   $r_1 = \text{arc sin } 0{,}577 = 35{,}2^\circ$

   $r_1 + i_2 = \beta$

   $i_2 = \beta - r_1$

   $= 60^\circ - 35{,}2^\circ = 24{,}8^\circ$

$\sin i_2 = \frac{1}{n} \sin r_2$

$\sin r_2 = n \sin i_2$

$= 1{,}5 \sin 24{,}8^o$

$= 1{,}5 \times 0{,}42 = 0{,}63$

$r_2 = \text{arc sin } 0{,}63 = 39^o$

$D = (60^o + 39^o) - 60^o = 39^o$

Jadi, sudut deviasi pada prisma sebesar 39°.

b. $\text{Sin } \frac{1}{2} (D_m + \beta) = n \sin \frac{1}{2}$

$= 1{,}5 \sin 30^o$

$= 1{,}5 \times 0{,}5 = 0{,}75$

$\frac{1}{2} (D_m + 60^o) = \text{arc sin } 0{,}75$

$\frac{1}{2} (D_m + 60^o) = 48{,}6$

$(D_m + 60^o) = 97{,}2^o$

$D_m = 97{,}2^o - 60^o = 37{,}2^o$

Jadi, sudut deviasi minimum pada prisma sebesar 37,2°.

c. $\text{Sin } \frac{1}{2} (D_m + \beta) = \frac{n}{n_a} \sin \frac{1}{2} \beta$

$= \frac{\frac{3}{2}}{\frac{4}{3}} \sin 30^o$

$= \frac{9}{8} \times 0{,}5 = 0{,}56$

$\frac{1}{2} (D_m + 60^o) = \text{arc sin } 0{,}56$

$\frac{1}{2} (D_m + 60^o) = 34{,}1^o$

$(D_m + 60^o) = 68{,}2^o$

$D_m = 68{,}2^o - 60^o = 8{,}2^o$

Jadi, sudut deviasi minimum pada prisma di dalam air sebesar 8,2°.

2. Sebuah prisma mempunyai sudut pembias 10^o dan indeks biasnya 1,5. Tentukan berapa sudut deviasi minimum pada prisma tersebut!

Penyelesaian :

$$D_m = (n - 1)\beta$$
$$= (1,5 - 1)\ 10^o$$
$$= 0,5 \times 10^o = 5^o$$

Jadi, sudut deviasi minimum pada prisma sebesar 5^o.

Soal Latihan :

1. Sebuah prisma dengan sudut pembias 45^o dan indeks bias 1,6. Seberkas sinar datang ke salah satu sisi prisma dengan sudut datang 30^o.

   Hitunglah :

   a. sudut deviasi yang terjadi,

   b. sudut deviasi minimumnya, dan

   c. sudut deviasi minimumnya jika berada di dalam air yang indeks biasnya $\frac{4}{3}$.

2. Sebuah prisma memiliki sudut pembias 10^o dan indeks biasnya 1,6. Tentukan besarnya sudut deviasi minimum yang terjadi pada prisma tersebut!

3. Sebuah prisma dengan sudut pembias 60^o. Apabila sudut deviasi minimum yang terjadi pada prisma tersebut adalah 30^o. Tentukan besarnya indeks bias prisma tersebut!

Info Sains

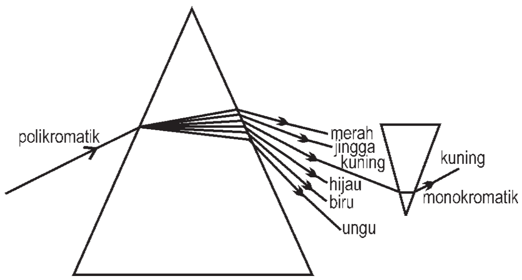


Sir Isaac Newton *(1642 - 1727) adalah seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris yang pertama kali menyatakan bahwa cahaya polikromatik terdiri atas berbagai warna cahaya.*

Sumber : wikipedia

2. Dispersi Cahaya

Dispersi yaitu peristiwa terurainya cahaya putih menjadi cahaya yang berwarna-warni, seperti terjadinya pelangi. Pelangi merupakan peristiwa terurainya cahaya matahari oleh butiran-butiran air hujan. Peristiwa peruraian cahaya ini disebabkan oleh perbedaan indeks bias dari masing-masing cahaya, di mana indeks bias cahaya merah paling kecil, sedangkan cahaya ungu memiliki indeks bias paling besar. Cahaya putih yang dapat terurai menjadi cahaya yang berwarna-warni disebut cahaya *polikromatik* sedangkan cahaya tunggal yang tidak bisa diuraikan lagi disebut cahaya *monokromatik*. Peristiwa dispersi juga terjadi apabila seberkas cahaya putih, misalnya cahaya matahari dilewatkan pada suatu prisma seperti pada **Gambar 2.2.**



Gambar 2.2 *Dispersi cahaya oleh prisma*

Cahaya polikromatik jika dilewatkan pada prisma akan terurai menjadi warna merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Kumpulan cahaya warna tersebut disebut *spektrum*. Lebar spektrum yang dihasilkan oleh prisma tergantung pada selisih sudut deviasi antara cahaya ungu dan cahaya merah. Selisih *sudut deviasi* antara cahaya ungu dan merah disebut *sudut dispersi* yang dirumuskan :

$$\varphi = D_u - D_m \qquad .... (2.4)$$

Jika sudut pembias prisma kecil (<15^o) dan n menyatakan indeks bias prisma serta medium di sekitar prisma adalah udara, maka besarnya sudut dispersi dapat dinyatakan :

$$\varphi = (n_u - n_m)\,\beta \qquad .... (2.5)$$

dengan :

φ = sudut dispersi

D_m = sudut deviasi cahaya merah

D_u = sudut deviasi cahaya ungu

n_m = indeks bias cahaya merah

n_u = indeks bias cahaya ungu

β = sudut pembias prisma

Contoh Soal

1. Sebuah prisma memiliki sudut pembias 60^o. Indeks bias untuk sinar merah 1,52 dan untuk sinar ungu 1,54. Seberkas sinar putih jatuh pada salah satu sisi prisma. Apabila dianggap semua cahaya mengalami deviasi minimum, hitunglah sudut dispersinya!

   Penyelesaian :

   Diketahui : β = 60^o

   n_m = 1,52

   n_u = 1,54

   Ditanyakan : φ = ...? (deviasi minimum)

Jawab :

Semua sinar mengalami deviasi minimum, maka :

untuk sinar merah :

$$\sin \frac{1}{2}(Dm_m + \beta) = n_m \sin \frac{1}{2}\beta$$

$$= 1{,}52 \sin 30^o$$

$$= 1{,}52 \times 0{,}5$$

$$= 0{,}76$$

$$\frac{1}{2}(Dm_m + 60^o) = \text{arc sin } 0{,}76$$

$$\frac{1}{2}(Dm_m + 60^o) = 49{,}5^o$$

$$(Dm_m + 60^o) = 99^o$$

$$Dm_m = 99^o - 60^o$$

$$= 39^o$$

untuk sinar ungu :

$$\text{Sin} \frac{1}{2}(Dm_u + \beta) = n_u \sin \frac{1}{2}\beta$$

$$= 1{,}54 \sin 30^o$$

$$= 1{,}54 \times 0{,}5$$

$$= 0{,}77$$

$$\frac{1}{2}(Dm_u + 60^o) = \text{arc sin } 0{,}77$$

$$\frac{1}{2}(Dm_u + 60^o) = 50{,}4^o$$

$$(Dm_u + 60^o) = 100{,}8^o$$

$$Dm_u = 100{,}8^o - 60^o$$

$$= 40{,}8^o$$

Jadi besarnya sudut dispersi yang terjadi adalah :

$$\varphi = Dm_u - Dm_m$$

$$= 40{,}8^o - 39^o$$

$$= 1{,}8^o$$

2. Sebuah prisma memiliki sudut pembias 10^o terbuat dari kaca kerona. Seberkas sinar datang ke salah satu sisi prisma. Jika diketahui indeks bias untuk sinar merah dan sinar ungu untuk prisma tersebut berturut-turut adalah 1,52 dan 1,54, tentukan besarnya sudut dispersinya!

Penyelesaian :

$\varphi = (nu - nm)\ \beta$

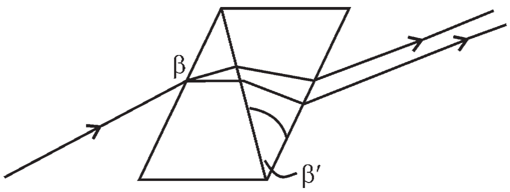
$= (1{,}54 - 1{,}52)\ 10^o$

$= 0{,}02 \times 10^o = 0{,}2^o$

Soal Latihan :

1. Sebuah prisma mempunyai sudut pembias 60^o dan seberkas sinar putih jatuh pada salah satu sisi prisma dengan sudut datang 45^o. Apabila diketahui indeks bias sinar merah 1,62 dan untuk sinar ungu 1,64, tentukan besarnya sudut dispersi yang terjadi pada prisma tersebut!
2. Seberkas sinar putih jatuh pada salah satu sisi sebuah prisma yang memiliki sudut pembias 12^o. Jika diketahui indeks bias untuk sinar merah dan ungu pada prisma tersebut adalah 1,62 dan 1,64, tentukan berapa besarnya sudut dispersi yang terjadi pada prisma tersebut!

3. Prisma Akromatik



Gambar 2.3 *Prisma akromatik*

Prisma akromatik adalah susunan dua buah prisma yang terbuat dari bahan yang berbeda, disusun secara terbalik yang berfungsi untuk meniadakan sudut deviasi yang terjadi pada prisma tersebut. Misalkan sebuah prisma terbuat dari *kaca kerona* yang mempunyai indeks bias untuk sinar merah n_m, sinar ungu n_u dan sudut pembiasnya β disusun dengan prisma yang terbuat dari *kaca flinta* yang memiliki indeks bias untuk sinar merah n'_m, sinar ungu n'_u dan sudut pembiasnya β' maka pada prisma akromatik berlaku bahwa besarnya sudut deviasi pada prisma flinta dan prisma kerona adalah sama. Karena pemasangan yang terbalik, sehingga kedua sudut deviasi saling meniadakan sehingga berkas sinar yang keluar dari susunan prisma tersebut berupa

sinar yang sejajar dengan berkas sinar yang masuk ke prisma tersebut. Pada prisma akromatik berlaku :

$$(n_u - n_m)\ \beta = (n'_u - n'_m)\ \beta'$$

$$\left(\frac{n_u - n_m}{n'_u - n'_m}\right) = \frac{\beta'}{\beta} \quad \text{.... (2.6)}$$

Contoh Soal

Sebuah prisma dengan sudut pembias 15° terbuat dari kaca kerona yang memiliki indeks bias untuk sinar merah 1,52 dan untuk sinar ungu 1,54 digabung dengan prisma yang terbuat dari kaca flinta sehingga membentuk susunan prisma akromatik. Apabila indeks bias sinar merah dan sinar ungu untuk kaca flinta adalah 1,62 dan 1,67, tentukan besarnya sudut pembias pada prisma flinta!

Penyelesaian :

Diketahui : $n_m = 1{,}52$
$n_u = 1{,}54$
$n'_u = 1{,}62$
$n'_m = 1{,}67$
$\beta = 15^o$

Ditanyakan : $\beta' = ...?$

Jawab :

$$(n_u - n_m)\ \beta = (n'_u - n'_m)\ \beta'$$

$$\beta' = \beta' = \left(\frac{n_u - n_m}{n'_u - n'_m}\right)\beta = \left(\frac{1{,}54 - 1{,}52}{1{,}67 - 1{,}62}\right)(15^o) = \frac{0{,}02}{0{,}05} \times 15^o = 6^o$$

Jadi, besarnya sudut pembias pada prisma flinta adalah 6°.

Life Skills : Kecakapan Akademik

Sebuah prisma memiliki sudut pembias 10° dan indeks bias untuk sinar merah dan ungu masing-masing adalah 1,51 dan 1,54 disusun dengan prisma lain yang memiliki indeks bias untuk sinar merah dan sinar ungu adalah 1,62 dan 1,66, sehingga membentuk susunan prisma akromatik. Tentukan besarnya sudut pembias pada prisma yang kedua tersebut!

Hasilnya dikumpulkan pada guru fisika kalian!

4. Prisma Pandang Lurus

Prisma pandang lurus yaitu susunan dua buah prisma yang disusun untuk menghilangkan sudut deviasi salah satu warna sinar, misalnya sinar hijau atau kuning.

Sebagai contoh sebuah prisma yang terbuat dari *kaca flinta* dengan indeks bias untuk sinar hijau n_h dan sudut pembiasnya β disusun dengan prisma yang terbuat dari *kaca kerona* dengan indeks bias sinar hijau n'_h dan sudut pembiasnya β'. Untuk meniadakan sudut dispersi sinar hijau maka akan berlaku :

$$\left(\frac{n_h - 1}{n'_h - 1}\right) = \frac{\beta'}{\beta} \qquad \text{.... (2.7)}$$

Soal Latihan :

Sebuah prisma terbuat dari kaca kerona dengan sudut pembias 12^o digabung dengan prisma yang terbuat dari kaca flinta sehingga membentuk susunan prisma pandang lurus untuk sinar hijau. Apabila diketahui untuk indeks bias sinar merah, sinar hijau, dan sinar ungu masing-masing untuk prisma kerona adalah n_m = 1,51 , n_h = 1,52 , n_u = 1,53 dan untuk prisma flinta n_m = 1,62 , n_h = 1,64 dan n_u = 1,66. Tentukan besarnya sudut pembias prisma flinta!

Life Skills : Kecakapan Sosial

Pada waktu musim hujan sering kita melihat adanya gejala alam yang kita sebut sebagai pelangi. Pelangi hanya kita lihat pada musim hujan saja dan jarang pada musim kemarau kita jumpai adanya pelangi. Pelangi terjadi apabila di depan kita terjadi hujan dan kita berdiri membelakang matahari. Pelangi yang terjadi pada pagi hari akan terlihat di bagian barat dan di sore hari akan terlihat di bagian timur dan bentuknya selalu menyerupai busur dan selalu terlihat pada sudut pandang 42^o terhadap garis horisontal. Cobalah diskusikan pada teman-teman anggota kelompokmu bagaimana pelangi itu terjadi dan presentasikan hasil diskusi di depan kelas.

B. Interferensi Cahaya

Interferensi cahaya adalah perpaduan antara dua gelombang cahaya. Agar interferensi cahaya dapat teramati dengan jelas, maka kedua gelombang cahaya itu harus bersifat *koheren*. Dua gelombang cahaya dikatakan koheren apabila kedua gelombang cahaya tersebut mempunyai amplitudo, frekuensi yang sama dan pada fasenya tetap. Ada dua hasil interferensi cahaya yang dapat teramati dengan jelas jika kedua gelombang tersebut berinterferensi. Apabila kedua gelombang cahaya berinteferensi saling memperkuat (bersifat konstruktif), maka akan menghasilkan *garis terang* yang teramati pada layar. Apabila kedua gelombang cahaya berinterferensi saling memperlemah (bersifat destruktif), maka akan menghasilkan garis gelap yang teramati pada layar. Marilah sekarang kita mempelajari peristiwa interferensi cahaya yang telah dilakukan percobaan/eksperimen oleh para ilmuwan terdahulu, seperti halnya **Thomas Young** dan **Fresnell**.

Info Sains

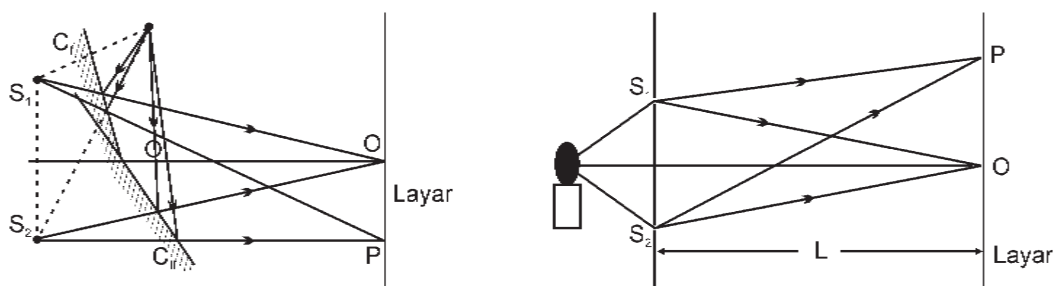


Thomas Young *(1773-1829), mengumpulkan bukti yang menunjukkan bahwa cahaya berjalan dalam bentuk gelombang. Ia menyimpulkan bahwa warna yang berbeda terbentuk dari gelombang yang berbeda panjangnya.*

Sumber : wikipedia

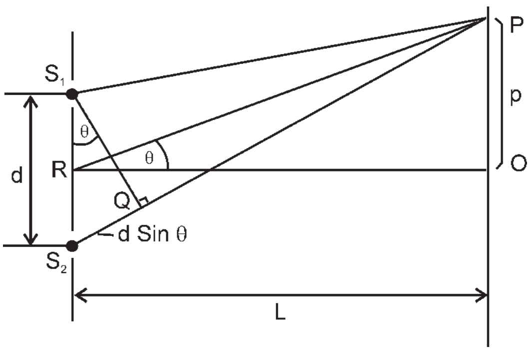
1. Interferensi Cahaya pada Celah Ganda

Percobaan yang dilakukan oleh **Thomas Young** dan Fresnel pada dasarnya adalah sama, yang membedakan adalah dalam hal mendapatkan dua gelombang cahaya yang koheren. Thomas Young mendapatkan dua gelombang cahaya yang koheren dengan menjatuhkan cahaya dari sumber cahaya pada dua buah celah sempit yang saling berdekatan, sehingga sinar cahaya yang keluar dari celah tersebut merupakan cahaya yang koheren. Sebaliknya **Fresnel** mendapatkan dua gelombang cahaya yang koheren dengan memantulkan cahaya dari suatu sumber ke arah dua buah cermin datar yang disusun hampir membentuk sudut 180°, sehingga akan diperoleh dua bayangan sumber cahaya. Sinar yang dipantulkan oleh cermin I dan II dapat dianggap sebagai dua gelombang cahaya yang koheren. Skema percobaan Young terlihat pada **Gambar 2.4.**



Gambar 2.4 *Interferensi celah ganda percobaan Young*

Untuk menunjukkan hasil interferensi cahaya, di depan celah tersebut diletakkan layar pada jarak L maka akan terlihat pada layar berupa garis gelap dan terang. Garis terang merupakan hasil interferensi yang saling memperkuat dan garis gelap adalah hasil interferensi yang saling memperlemah. Hasil interferensi bergantung pada selisih jarak tempuh/ lintasan cahaya dari celah ke layar. Akan terjadi garis terang jika selisih lintasan merupakan kelipatan bilangan genap kali $\frac{1}{2}\lambda$ atau $\left(2n\frac{1}{2}\lambda\right)$ atau kelipatan bilangan bulat kali λ atau ($n\lambda$). Sebaliknya akan terjadi garis gelap jika selisih lintasan merupakan kelipatan bilangan ganjil kali $\frac{1}{2}\lambda$ atau $\left((2n-1)\frac{1}{2}\lambda\right)$.



Gambar 2.5 *Interferensi celah ganda*

Misalkan jarak antara dua celah d, jarak layar ke celah L, di titik O pada layar akan terjadi garis terang yang disebut garis terang pusat, karena jarak S_1O dan S_2O adalah sama sehingga gelombang cahaya sampai di O akan terjadi interferensi maksimum. Di titik P yang berjarak p dari terang pusat akan terjadi interferensi maksimum atau minimum tergantung pada selisih lintasan $S_2P - S_1P$. Perhatikan **Gambar 2.5!**

Di P terjadi interferensi maksimum jika :

$S_2P - S_1P = d \sin\theta = n\lambda$

Perhatikan segitiga S_1QS_2 dan segitiga POR , untuk nilai θ <<< berlaku $\sin\theta = \text{tg}\,\theta = \frac{p}{L}$, sehingga: $\frac{dp}{L} = n\lambda$ atau

$$p = \frac{n\lambda L}{d} \qquad \text{.... (2.8)}$$

dengan :

d = jarak antara dua celah (m)

p = jarak garis terang ke terang pusat (m)

L = jarak celah ke layar

λ = panjang gelombang cahaya

n = orde interferensi (n = 0, 1, 2, 3, ...)

Di P akan terjadi interferensi minimum/garis gelap jika :

$$\frac{dp}{L} = (2n - 1)\,\frac{1}{2}\,\lambda \qquad \text{.... (2.9)}$$

dengan

d = jarak antara dua celah (m)

p = jarak garis gelap ke terang pusat (m)

L = jarak celah ke layar (m)

λ = panjang gelombang cahaya (m)

n = orde interferensi (n = 1, 2, 3, ...)

Contoh Soal

Dua buah celah sempit terpisah pada jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Sebuah layar diletakkan 1 meter di belakang celah. Garis terang orde ke-3 pada layar terletak 7,5 mm dari terang pusat. Tentukan berapa panjang gelombang cahaya yang digunakan!

Penyelesaian :

Diketahui : d = 0,2 mm = 2 .10^{-4} m

L = 1 m

p = 7,5 mm = 7,5.10^{-3} m

n = 3

Ditanyakan : λ = ... ?

Jawab :

$$p = \frac{nL\lambda}{d}$$

$$\lambda = \frac{pd}{nL} = \frac{7{,}5 \times 10^{-3}\ .\ 2 \times 10^{-4}}{3 \times 1} = \frac{15}{3} \times 10^{-7}\text{ m} = 5000\text{ Å}.$$

Jadi, panjang gelombang cahaya yang digunakan sebesar 5000 Å.

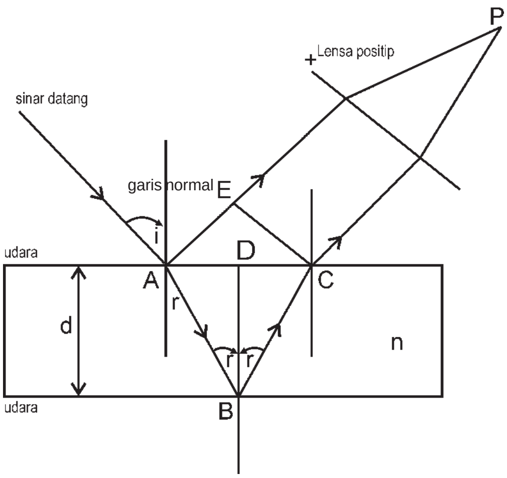
Soal Latihan :

1. Dua buah celah sempit terpisah pada jarak 0,3 mm disinari tegak lurus cahaya monokromatik dan sebuah layar diletakkan di belakang celah pada jarak 0,9 m dari layar. Apabila jarak garis gelap orde ke 2 terletak 3 mm dari terang pusat, tentukan panjang gelombang cahaya yang dipakai!

2. Seberkas cahaya yang panjang gelombangnya 6 x 10^{-7} m dijatuhkan pada dua buah celah sempit yang terpisah pada jarak 0,3 mm dan sebuah layar diletakkan 2 meter di belakang celah. Tentukan jarak garis terang orde ke-2 dan jarak garis gelap orde 1 dari terang pusat!

2. Interferensi pada Selaput Tipis

Dalam kehidupan sehari-hari sering kita melihat adanya warna-warna pelangi yang terjadi pada gelembung air sabun atau adanya lapisan minyak di permukaan air jika terkena cahaya matahari. Hal ini menunjukkan adanya interferensi cahaya matahari pada selaput tipis air sabun atau selaput tipis minyak di atas permukaan air. Interferensi cahaya terjadi dari cahaya yang dipantulkan oleh lapisan permukaan atas dan bawah dari selaput tipis tersebut. Untuk lebih jelasnya perhatikan **Gambar 2.6.**



Gambar 2.6 *Interferensi pada selaput tipis*

Gambar tersebut melukiskan seberkas sinar monokromatik jatuh pada selaput tipis setebal d, pada lapisan atas selaput cahaya dipantulkan (menempuh lintasan AE) dan sebagian dibiaskan yang kemudian dipantulkan lagi oleh lapisan bawah menempuh lintasan ABC. Antara sinar yang menempuh lintasan AE dan ABC akan saling berinterferensi di titik P tergantung pada selisih jarak lintasan optik. Di titik P akan terjadi interferensi maksimum atau garis terang apabila :

$$2nd \cos r = (2m + 1)\frac{1}{2}\lambda \qquad \text{.... 2.10)}$$

dan terjadi garis gelap atau interferensi minimum jika

$$2nd \cos r = (2m)\frac{1}{2}\lambda \qquad \text{.... (2.11)}$$

dengan :

n = indeks bias lapisan tipis

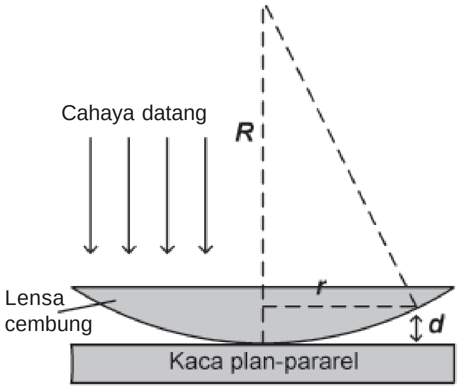
d = tebal lapisan

r = sudut bias sinar

λ = panjang gelombang sinar

m = orde interferensi

3. Cincin Newton



***Gambar 2.7** Cincin Newton*

Cincin Newton merupakan pola interferensi pada selaput tipis udara yang berupa lingkaran-lingkaran garis gelap dan terang yang sepusat. Cincin Newton terletak antara permukaan optik. Cincin Newton dapat terjadi pada selaput tipis udara antara kaca plan-paralel dan lensa plan-konveks yang disinari cahaya sejajar monokromatik secara tegak lurus dari atas kaca plan-paralel. Cincin Newton ini terjadi karena interferensi cahaya yang dipantulkan oleh permukaan cembung lensa dengan sinar yang telah menembus lapisan udara, yang kemudian dipantulkan oleh permukaan bagian atas kaca plan-paralel. Perhatikan **gambar 2.7** di bawah, apabila r menyatakan jari-jari orde lingkaran, R jari-jari kelengkungan permukaan lensa, n merupakan orde lingkaran, dan λ menyatakan panjang gelombang cahaya yang digunakan, maka hubungan antara jari-jari orde interferensi dengan panjang gelombang cahaya yang digunakan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini.

$$r_n^2 = (2n + 1)\frac{1}{2}\lambda \qquad \text{.... (2.12)}$$

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

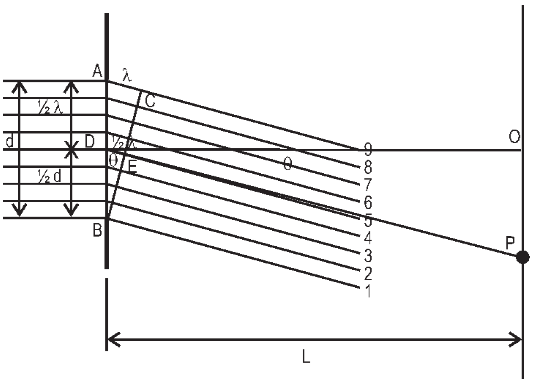
Pada dewasa ini telah banyak alat-alat yang bekerja dengan memanfaatkan teknologi gelombang dan cahaya di antara adalah mesin fotokopi, scanner, faxsimile dan lain-lain. Cobalah sekarang kalian cari data pada sebuah mesin fotokopi yang menyangkut tentang data spesifikasi mesin tersebut di antaranya tentang pemakaian energi listriknya, kemampuan mengkopi tiap menitnya dan banyaknya tinta yang dipakai. Bandingkan antara merk mesin fotokopi misalnya merk Minolta, Sharp, Xerox yang manakah yang paling efisien?

C. Difraksi Cahaya

Apabila permukaan gelombang melewati sebuah celah sempit, di mana lebar celah lebih kecil daripada panjang gelombangnya, maka gelombang tersebut akan mengalami lenturan. Selanjutnya terjadi gelombang setengah lingkaran yang melebar di daerah bagian belakang celah tersebut. Peristiwa ini disebut *difraksi* atau *lenturan*.

1. Difraksi Cahaya pada Celah Tunggal

Difraksi/lenturan cahaya pada celah tunggal akan menghasilkan garis terang/interferensi maksimum pada layar yang berjarak L dari celah apabila selisih lintasan antara cahaya yang datang dari A dan B adalah $(2n + 1)\,\frac{1}{2}\,\lambda$, kemudian akan terjadi garis gelap atau interferensi minimum jika selisih lintasannya adalah $(2n)\,\frac{1}{2}\,\lambda$.



Gambar 2.8 *Difraksi pada celah tunggal*

Perhatikan **Gambar 2.8**, menggambarkan sebuah celah sempit yang mempunyai lebar d, disinari dengan cahaya sejajar monokromatik secara tegak lurus pada celah. Apabila di belakang celah ditaruh layar pada jarak L dari celah maka akan tampak pada layar berupa garis terang dan gelap yang berada di sekitar terang pusat. Celah sempit tersebut kita bagi menjadi 2 bagian yang masing-masing lebarnya $\frac{1}{2}d$. Kelompok cahaya dari bagian atas dan bawah akan berinterferensi di titik P yang terletak pada layar tergantung pada selisih lintasannya. Di titik O yang berada pada layar yang juga merupakan titik tengah-tengah celah, maka semua cahaya yang berasal dari celah bagian atas dan bagian bawah sampai ke titik O mempunyai jarak lintasan yang sama, sehingga di titik O terjadi interferensi maksimum atau sering juga disebut dengan terang pusat. Sedangkan hasil interferensi di titik P tergantung pada selisih lintasan yang ditempuh oleh cahaya tersebut.

Apabila celah kita bagi dua maka cahaya dari tepi celah cahaya 1 dan 5 akan berinterferensi di titik P akan menghasilkan garis gelap jika selisih lintasannya $\frac{1}{2}\,\lambda$. Persamaannya dapat dituliskan : $\frac{1}{2}\,d \sin\theta = \frac{1}{2}\,\lambda$ atau $d \sin\theta = \lambda$

Apabila celah dibagi empat, maka garis gelap akan terjadi bila $\frac{1}{4}\,d\sin\theta = \frac{1}{2}\,\lambda$ atau $d \sin\theta = 2\,\lambda$. Apabila celah dibagi 6, maka garis gelap akan terjadi bila $\frac{1}{6}\,d \sin\theta = \frac{1}{2}\,\lambda$ atau

d sin $\theta = 3\ \lambda$, dan seterusnya. Jadi untuk garis gelap ke-n pada layar akan terbentuk jika d sin $\theta = n\ \lambda$; n = 1, 2, 3, ... dan seterusnya.

Untuk sudut θ kecil berlaku bahwa sin θ = tg $\theta = \frac{p}{L}$, maka :

$$\frac{dp}{L} = n\lambda \qquad \text{.... (2.13)}$$

dengan :

d = lebar celah (m)

p = jarak garis gelap ke terang pusat (m)

L = jarak layar ke celah (m)

λ = panjang gelombang cahaya yang digunakan (m)

n = orde interferensi/ menyatakan garis gelap dari terang pusat

Dengan cara yang sama di titik P akan terjadi garis terang jika :

$$\frac{dp}{L} = (2n + 1)\ \frac{1}{2}\ \lambda \qquad \text{.... (2.14)}$$

Contoh Soal

Seberkas cahaya yang panjang gelombangnya 6000 Å dijatuhkan tegak pada sebuah celah tunggal yang lebarnya 0,2 mm. Sebuah layar diletakkan 1 meter di belakang celah, tentukan jarak garis terang orde ke-2 dari terang pusat!

Penyelesaian:

Diketahui : λ = 6000 Å = $6.\ 10^{-7}$ m

L = 1 m

d = 0,2 mm = $2.\ 10^{-4}$ m

n = 2

Ditanyakan : p = ...?

Jawab : $P = (2n + 1)\ \frac{1}{2}\ \frac{\lambda L}{d}$

$= (2.2 + 1)\ \frac{1}{2}\ \frac{6.10^{-7}.1}{2.10^{-4}}$

$= \frac{5}{2}\ (3.\ 10^{-3}) = 7{,}5.10^{-3}$ m = 7,5 mm

Jadi, jarak garis terang orde ke-2 dari terang pusat sebesar 7,5 mm.

Soal Latihan :

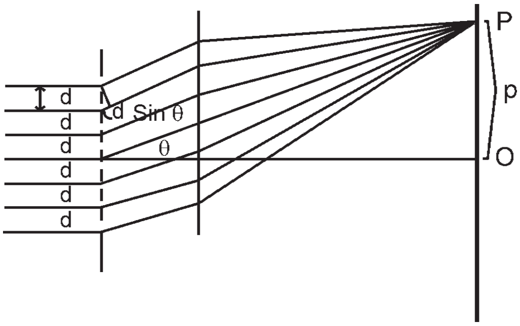
1. Sebuah celah tunggal yang lebarnya d disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya 6000 Å. Apabila pola difraksi maksimum orde pertama terjadi pada sudut 30^o, tentukan berapa lebar celah tersebut!

2. Suatu berkas sinar sejajar didatangkan tegak lurus celah sempit yang lebarnya 0,4 mm. Di belakang celah diberi lensa positif dengan jarak titik api 40 cm. Apabila garis gelap orde pertama pada layar yang terletak di bidang titik api lensa terletak 0,56 mm, tentukan panjang gelombang cahaya tersebut!

2. Difraksi Cahaya pada Kisi

Kisi adalah celah sangat sempit yang dibuat dengan menggores sebuah lempengan kaca dengan intan. Sebuah kisi dapat dibuat 300 sampai 700 celah setiap 1 mm. Pada kisi, setiap goresan merupakan celah. Sebuah kisi memiliki konstanta yang menyatakan banyaknya goresan tiap satu satuan panjang, yang dilambangkan dengan *d*, yang juga sering dikatakan menjadi lebar celah. Dalam sebuah kisi, lebar celah dengan jarak antara dua celah sama apabila banyaknya goresan tiap satuan panjang dinyatakan dengan *N*, maka $d = \frac{1}{N}$. Misalnya sebuah kisi memiliki 500 garis/mm maka lebar celah kisi tersebut adalah $d = \frac{1}{500}$ mm = $\frac{1}{500.000}$ m = 2×10^{-6} m.

Pada sebuah kisi yang disinari cahaya yang sejajar dan tegak lurus kisi, dan di belakang kisi ditempatkan sebuah layar, maka pada layar tersebut akan terdapat garis terang dan gelap, jika cahaya yang dipakai adalah monokromatik. Kemudian akan terbentuk deretan spektrum warna, jika cahaya yang digunakan sinar putih (polikromatik). Garis gelap dan terang atau pembentukan spektrum akan lebih jelas dan tajam jika celabar celahnya semakin sempit atau konstanta kisinya semakin banyak/besar. Garis gelap dan terang dan spektrum tersebut merupakan hasil interferensi dari cahaya yang berasal dari kisi tersebut yang jatuh pada layar titik/ tempat tertentu.



Gambar 2.9 *Difraksi pada kisi*

Gambar 2.9 menggambarkan cahaya monokromatik sejajar yang datang tegak lurus bidang kisi, cahaya yang melalui kisi dilenturkan dan memiliki fase yang sama. Semua cahaya yang melalui celah kisi akan dikumpulkan menjadi satu oleh lensa positif dan diproyeksikan pada layar menjadi garis terang dan gelap.

Misalkan semua cahaya yang melalui celah kisi dilenturkan/didifraksikan dengan sudut θ dan dikumpulkan pada satu titik P yang berjarak p dari terang pusat (O) pada layar yang berjarak L dari kisi. Hasil interferensi cahaya di titik P tergantung pada selisih lintasan yang ditempuh cahaya dari celah yang berdekatan yaitu d sin θ. Di titik P akan terjadi garis terang jika d sin θ sama dengan kelipatan bilangan bulat kali panjang gelombang atau kelipatan bilangan genap kali setengah gelombang. Sebaliknya akan terjadi garis gelap jika d sin θ sama dengan kelipatan bilangan ganjil kali setengah panjang gelombang. Secara matematik dapat dinyatakan :

Di P terjadi garis terang jika :

$$d \sin \theta = n\,\lambda \quad \text{atau} \quad p = \frac{n\lambda L}{d} \qquad \text{.... (2.15)}$$

Di P akan terjadi garis gelap jika :

$$d \sin \theta = (2n + 1)\,\frac{1}{2}\lambda \quad \text{atau} \quad p = \frac{(2n + 1)\,\lambda L}{d} \qquad \text{.... (2.16)}$$

dengan :

d = lebar celah kisi (m)

θ = sudut difraksi (derajat)

λ = panjang gelombang cahaya (m)

n = orde difraksi

p = jarak garis gelap/terang ke terang pusat (m)

L = jarak layar ke kisi (m)

Contoh Soal

Suatu berkas cahaya yang panjang gelombangnya 5.10^{-7} m dijatuhkan tegak lurus pada sebuah kisi difraksi. Jika spektrum orde kedua jatuh pada sudut 30° terhadap garis normal pada kisi, tentukan besarnya konstanta kisi (banyaknya goresan tiap meter) tersebut!

Penyelesaian :

Diketahui : $\lambda = 5.\ 10^{-7}$ m

$\theta = 30^o$

$n = 2$

Ditanyakan : $N = ?$

Jawab : $d \sin\theta = n\lambda$

$$d = \frac{n\lambda}{\sin\theta} = \frac{2 \times 5.10^{-7}}{\sin 30^o} = \frac{10^{-6}}{\frac{1}{2}} = 2.10^{-6} \text{ m}$$

$$N = \frac{1}{d} = \frac{1}{2.10^6} = 5 \times 10^5 \text{ celah/meter}$$

Jadi, banyaknya goresan tiap meter adalah : 5×10^5 celah/meter.

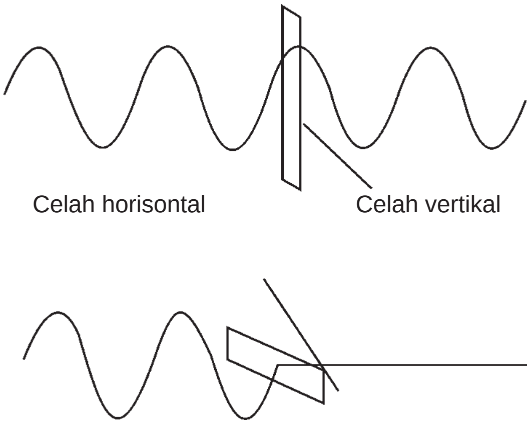
Soal Latihan :

1. Sebuah kisi yang memiliki 4.000 garis tiap sentimeter disinari tegak cahaya monokromatik yang panjang gelombangnya 6.000 Å. Tentukan orde maksimum garis terang yang dapat diamati!
2. Sebuah kisi yang memiliki 5.000 garis tiap sentimeter disinari dengan cahaya secara tegak lurus. Apabila spektrum orde ke-3 terbentuk pada sudut 30° terhadap garis normal bidang kisi, tentukan panjang gelombang cahaya yang digunakan!

Life Skills : Kecakapan Vokasional

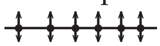
Adanya difraksi cahaya akan memengaruhi hasil pembentukan bayangan pada alat optik misalnya kamera. Pada sebuah kamera profesional selalu dilengkapi dengan tombol pengatur kecepatan, diafragma, fokus dan ukuran kepekaan film yang digunakan (ASA) yang pada umumnya tertulis dalam angka-angka. Cobalah kamu membuat tabel pengaturan dari kecepatan dan bukaan diafragma untuk memotret dalam ruangan yang redup, ruangan yang terang dan memotret benda yang bergerak agar dihasilkan gambar yang bagus. Berilah alasan atas pilihannya penggunaan tersebut!

D. Polarisasi Cahaya



Gambar 2.10 *Polarisasi gelombang*

Polarisasi adalah peristiwa penyerapan arah bidang getar dari gelombang. Gejala polarisasi hanya dapat dialami oleh gelombang transversal saja, sedangkan gelombang longitudinal tidak mengalami gejala polarisasi. Fakta bahwa cahaya dapat mengalami polarisasi menunjukkan bahwa cahaya merupakan gelombang transversal. Pada umumnya, gelombang cahaya mempunyai banyak arah getar. Suatu gelombang yang mempunyai banyak arah getar disebut *gelombang tak terpolarisasi,* sedangkan gelombang yang memilki satu arah getar disebut *gelombang terpolarisasi*. Gejala polarisasi dapat digambarkan dengan gelombang yang terjadi pada tali yang dilewatkan pada celah. Apabila tali digetarkan searah dengan celah maka gelombang pada tali dapat melewati celah tersebut. Sebaliknya jika tali digetarkan dengan arah tegak lurus celah maka gelombang pada tali tidak bisa melewati celah tersebut.

Sinar alami seperti sinar Matahari pada umumnya adalah sinar yang tak terpolarisasi. Sinar tak terpolarisasi dilambangkan  sedangkan sinar yang terpolarisasi dilambangkan  atau  .

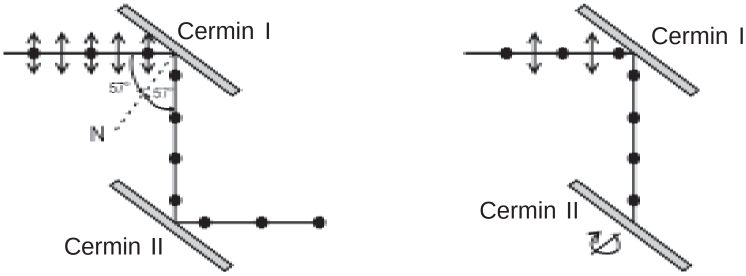
Cahaya dapat mengalami polarisasi dengan berbagai cara, antara lain karena peristiwa *pemantulan, pembiasan, bias kembar, absorbsi selektif, dan hamburan.*

1. Polarisasi karena Pemantulan

Perhatikan **Gambar 2.11** menggambarkan peristiwa polarisasi yang terjadi pada cahaya yang disebabkan oleh peristiwa pemantulan. Cahaya yang datang ke cermin dengan sudut datang sebesar 57^{o}, maka sinar yang terpantul akan merupakan cahaya yang terpolarisasi. Cahaya yang berasal dari cermin I adalah cahaya terpolarisasi akan dipantulkan ke cermin. Apabila cermin II diputar sehingga arah bidang getar antara cermin I dan cermin II saling tegak lurus, maka tidak akan ada cahaya yang dipantulkan oleh cermin II. Peristiwa ini menunjukkan terjadinya peristiwa polarisasi.

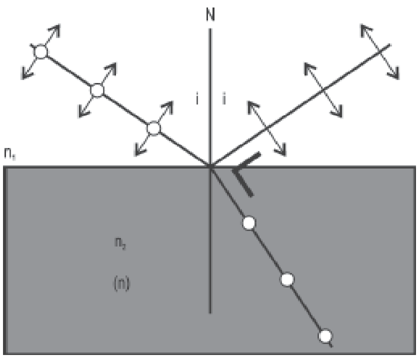
Cermin I disebut *polarisator,* sedangkan cermin II disebut *analisator*. Polarisator akan menyebabkan sinar yang tak terpolarisasi menjadi sinar yang terpolarisasi, sedangkan

analisator akan menganalisis sinar tersebut merupakan sinar terpolarisasi atau tidak.



Gambar 2.11 Polarisasi gelombang karena pemantulan

2. Polarisasi karena Pemantulan dan Pembiasan



Gambar 2.12 Polarisasi karena pemantulan dan pembiasan

Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan para ilmuwan Fisika menunjukkan bahwa polarisasi karena pemantulan dan pembiasan dapat terjadi apabila cahaya yang dipantulkan dengan cahaya yang dibiaskan saling tegak lurus atau membentuk sudut 90°. Di mana cahaya yang dipantulkan merupakan cahaya yang terpolarisasi sempurna, sedangkan sinar bias merupakan sinar terpolarisasi sebagian. Sudut datang sinar yang dapat menimbulkan cahaya yang dipantulkan dengan cahaya yang dibiaskan merupakan sinar yang terpolarisasi. Sudut datang seperti ini dinamakan *sudut polarisasi* (i_p) atau *sudut Brewster*. Pada saat sinar pantul dan sinar bias saling tegak lurus (membentuk sudut 90°) akan berlaku ketentuan bahwa : $i' + r = 90°$ atau $r = 90° - i$

Dari hukum Snellius tentang pembiasan berlaku bahwa :

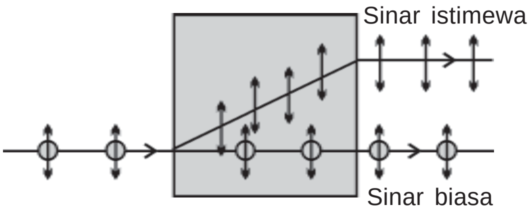
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} = \text{n}$$

$$\frac{\sin i_p}{\sin (90 - i_p)} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

$$\frac{\sin i_p}{\cos i_p} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

$$\text{tg } i_p = \frac{n_2}{n_1} = \text{n} \qquad \text{.... (2.17)}$$

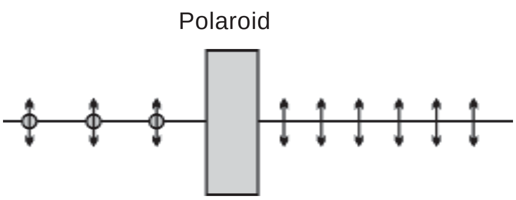
3. Polarisasi karena Bias Kembar (Pembiasan Ganda)



Gambar 2.13 *Polarisasi bias kembar*

Polarisasi karena bias kembar dapat terjadi apabila cahaya melewati suatu bahan yang mempunyai indeks bias ganda atau lebih dari satu, misalnya pada kristal kalsit. Perhatikan **Gambar 2.13,** seberkas cahaya yang jatuh tegak lurus pada permukaan kristal kalsit, maka cahaya yang keluar akan terurai menjadi dua berkas cahaya, yaitu satu berkas cahaya yang tetap lurus dan berkas cahaya yang dibelokkan. Cahaya yang lurus disebut *cahaya biasa,* yang memenuhi hukum Snellius dan cahaya ini tidak terpolarisasi. Sedangkan cahaya yang dibelokkan disebut *cahaya istimewa* karena tidak memenuhi hukum Snellius dan cahaya ini adalah cahaya yang terpolarisasi.

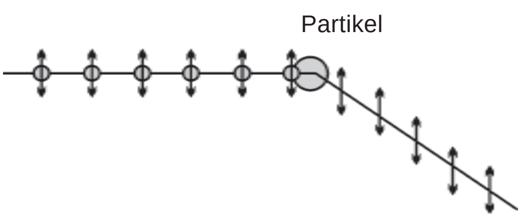
4. Polarisasi karena Absorbsi Selektif



Gambar 2.14 *Polarisasi absorpsi selektif*

Polaroid adalah suatu bahan yang dapat menyerap arah bidang getar gelombang cahaya dan hanya melewatkan salah satu bidang getar. Seberkas sinar yang telah melewati polaroid hanya akan memiliki satu bidang getar saja sehingga sinar yang telah melewati polaroid adalah sinar yang terpolarisasi. Peristiwa polarisasi ini disebut polarisasi karena *absorbsi selektif*. Polaroid banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, antara lain untuk pelindung pada kacamata dari sinar matahari (kacamata *sun glasses*) dan polaroid untuk kamera.

5. Polarisasi karena Hamburan



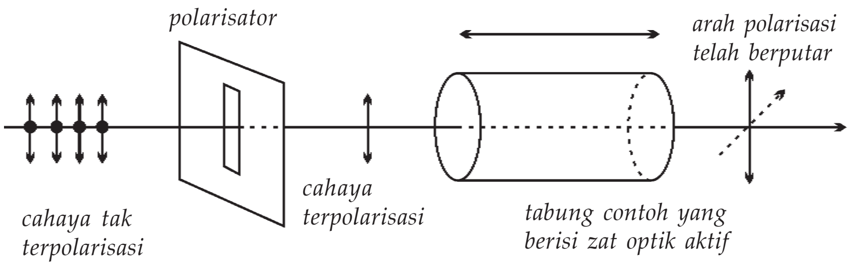
Gambar 2.15 *Polarisasi karena hamburan*

Polarisasi cahaya karena peristiwa hamburan dapat terjadi pada peristiwa terhamburnya cahaya matahari oleh partikel-partikel debu di atmosfer yang menyelubungi Bumi. Cahaya matahari yang terhambur oleh partikel debu dapat terpolarisasi. Itulah sebabnya pada hari yang cerah langit kelihatan berwarna biru. Hal itu disebabkan oleh warna cahaya biru dihamburkan paling efektif dibandingkan dengan cahaya-cahaya warna yang lainnya.

6. Pemutaran Bidang Polarisasi

Perhatikan **Gambar 2.16**, seberkas cahaya tak terpolarisasi melewati sebuah polarisator sehingga cahaya yang diteruskan terpolarisasi. Cahaya terpolarisasi melewati *zat optik aktif*, misalnya larutan gula pasir, maka arah polarisasinya dapat berputar. Besarnya sudut perubahan arah polarisasi cahaya θ tergantung pada konsentrasi larutan c, panjang larutan ℓ dan sudut putar larutan β. Hubungan ini dapat ditulis secara matematik sebagai:

$$\theta = c.\beta.\ell \qquad \text{.... (2.18)}$$



Gambar 2.16 *Pemutaran bidang polarisasi untuk menentukan konsentrasi larutan gula.*

Seputar Tokoh



James Clerk Maxwell (1832 - 1879) dilahirkan di Edinbrgh, Skotlandia. Dalam pemikirannya ia mempersoalkan teori kelistrikan dan kemagnetan yang pada waktu itu kurang memuaskan. Dalam tahun 1864 dan1873 ia mengembangkan gambaran teoritis yang menggambarkan bahwa kelistrikan dan kemagnetan muncul sebagai dua aspek dari gejala yang sama. Atas dasar teori inilah ia meramalkan adanya gelombang elektromagnetik yang menjalar dengan kelajuan sama dengan cahaya. Teori yang dikemukakan oleh Maxwell dinyatakan kebenarannya oleh Heinrich Hertz pada tahun 1888. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Sudut deviasi yaitu sudut yang dibentuk antara arah sinar yang menuju ke prisma dengan arah sinar yang meninggalkan prisma. Besarnya sudut deviasi dinyatakan $D = i_1 + r_2 - \beta$.
2. Sudut deviasi minimum terjadi pada saat $i_1 = r_2$ dan $i_2 = r_1$, besarnya sudut deviasi minimum dinyatakan $n_1 \sin \frac{1}{2} (D_m + \beta) = n_2 \sin \frac{1}{2} \beta$. Untuk nilai β kecil di bawah 15°, deviasi minimum bisa dinyatakan $D_m = (n - 1)\ \beta$.
3. Dispersi yaitu peristiwa terurainya cahaya menjadi cahaya-cahaya berwarna yang disebabkan karena masing-masing cahaya berwarna memiliki indeks bias yang berbeda.
4. Sudut dispersi yaitu sudut yang dibentuk oleh cahaya merah dan ungu yang keluar dari prisma.
5. Besarnya sudut dispersi dinyatakan $\varphi = D_u - D_m$ atau $\varphi = (n_u - n_m)\ \beta$.
6. Prisma akromatik yaitu susunan dua prisma yang disusun secara terbalik, berfungsi untuk menghilangkan sudut dispersi. Pada prisma akromatik berlaku
$$\left(\frac{n_u - n_m}{n'_u - n'_m}\right) = \frac{\beta'}{\beta}$$
7. Prima pandang lurus yaitu susunan dua buah prisma yang disusun secara terbalik, berfungsi untuk menghilangkan sudut deviasi pada salah satu warna cahaya, misalnya untuk cahaya warna hijau maka berlaku
$$\left(\frac{n_h - 1}{n'_h - 1}\right) = \frac{\beta'}{\beta}$$
8. Interferensi cahaya pada celah ganda akan menghasilkan garis terang (interferensi maksimum) jika $\frac{dp}{L} = n\lambda$ dan garis gelap (interferensi minimum) jika $\frac{dp}{L} = (2n - 1)\ \frac{1}{2}\lambda$.
9. Interferensi cahaya pada selaput tipis akan menghasilkan garis terang jika $2nd \cos r = (2m + 1)\ \frac{1}{2}\ \lambda$ dan garis gelap jika $2nd \cos r = (2m)\ \frac{1}{2}\lambda$.
10. Interferensi pada cicin Newton akan terjadi garis lingkaran terang (interferensi maksimum) jika $r_n^2 = (2n + 1)\ \frac{1}{2}\lambda$ dan terjadi garis lingkaran gelap (interferensi minimum) jika $r_n^2 = n\lambda$.
11. Difraksi cahaya pada celah tunggal akan menghasilkan garis terang (interferensi maksimum) jika $\frac{dp}{L} = (2n + 1)\ \frac{1}{2}\lambda$ dan garis gelap (interferensi minimum) jika $\frac{dp}{L} = n\lambda$.

12. Difraksi pada kisi akan menghasilkan garis terang (interferensi maksimum) jika $d\ Sin\ \theta = n\ \lambda$ atau $p = \frac{n\lambda L}{d}$ dan garis gelap interferensi minimum) jika

$d\ \sin\ \theta = (2n + 1)\ \frac{1}{2}\lambda$ atau

$p = \frac{(2n+1)\ \lambda L}{d}$.

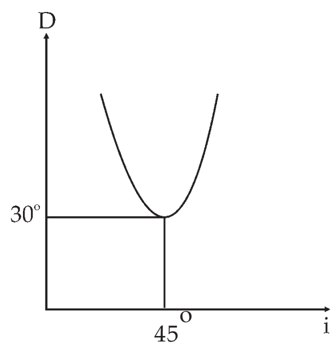
13. Polarisasi cahaya yaitu peristiwa penyerapan arah bidang getar dari gelombang. Polarisasi hanya terjadi pada gelombang transversal. Polarisasi dapat terjadi karena : pemantulan, pembiasan, bias kembar, absorbsi selektif, dan hamburan.

14. Pada polarisasi karena pemantulan dan pembiasan, di mana sinar pantul dan sinar bias akan terpolarisasi jika tg sudut datang sama dengan indeks bias bahan (tg = n), pernyataan ini dikenal dengan sudut Breswer.

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. 

Grafik di samping ini menyatakan sudut deviasi (D) terhadap sudut datang (i) pembias pada prisma :
Besarnya sudut pembias prisma adalah ....
A. 30°
B. 45°
C. 60°
D. 75°
E. 90°

2. Suatu prisma berbentuk segitiga sama kaki dengan indeks bias 1,5. Seberkas sinar monokromatik dijatuhkan pada salah satu sisinya tepat tegak lurus bidang pembias prisma. Setelah keluar dari prisma sudut penyimpangan sinar tarhadap arah sinar semula sebesar ....
A. 30°
B. 45°
C. 60°
D. 75°
E. 90°

3. Pada percobaan Young digunakan dua celah sempit yang berjarak 0,3 mm satu dengan lainnya. Jika jarak layar dengan celah 1 m dan garis terang pertama dari terang pusat 1,5 mm, maka panjang gelombang cahaya adalah ....
   A. $4,5 \cdot 10^{-7}$ m
   B. $4,5 \cdot 10^{-6}$ m
   C. $4,5 \cdot 10^{-5}$ m
   D. $4,5 \cdot 10^{-4}$ m
   E. $4,5 \cdot 10^{-3}$ m

4. Cahaya merupakan gelombang transversal. Hal ini dibuktikan berdasarkan percobaan yang menunjukkan adanya ....
   A. difraksi
   B. polarisasi
   C. interferensi
   D. refraksi
   E. refleksi

5. Prisma A mempunyai sudut pembias 5^o mengalami deviasi minimum yang sama dengan prisma B yang sudut pembiasnya 8^o. Jika indeks bias prisma A = $\frac{4}{3}$ maka indeks bias prisma B adalah ....
   A. 1,2
   B. 1,4
   C. 1,5
   D. 1,6
   E. 1,8

6. Suatu celah tunggal disinari oleh cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 5,98 nm. Agar difraksi maksimum orde pertama terjadi pada sudut 30^o, maka lebar celahnya adalah ....
   A. 5.890 Å
   B. 11.780 Å
   C. 17.670 Å
   D. 23.670 Å
   E. 29.450 Å

7. Warna biru langit terjadi karena cahaya matahari mengalami ....
   A. difraksi
   B. hamburan
   C. interferensi
   D. pemantulan
   E. pembiasan

8. Dalam percobaan interferensi dua celah (percobaan Young) digunakan cahaya monokromatik cahaya kuning, maka pada layar terlihat ....
   A. garis kuning dan gelap berselang-seling dengan garis yang di tengah kuning
   B. garis kuning dan gelap berselang-seling dengan garis yang di tengah gelap
   C. garis berwarna seperti pelangi dengan garis yang di tengah kuning
   D. garis berwarna seperti pelangi dengan garis yang di tengah gelap
   E. garis terang dan gelap berselang-seling dengan garis yang di tengah putih

9. Apabila cahaya matahari mengenai suatu lapisan tipis minyak yang ada di atas permukaan air, maka warna-warni yang terlihat timbul karena gejala ....
   A. difraksi
   B. dispersi
   C. interferensi
   D. polarisasi
   E. refleksi

10. Dua gelombang koheren berinterferensi. Di tempat tersebut terjadi sinar terang , beda fase kedua gelombang sama dengan .... (n = 1, 2, 3, 4, ...)
   A. $\frac{1}{2}(2n + 1)\pi$
   B. $(n + 1)\pi$
   C. $(2n + 1)\pi$
   D. $2(n + 1)\pi$
   E. $\frac{1}{2}(n + 1)\pi$

B. Kerjakan soal di bawah ini!

1. Sebutkan syarat terjadinya sudut deviasi minimum pada prisma!
2. Seberkas sinar dijatuhkan pada salah satu sisi bidang pembias prisma sama sisi dengan sudut datang 60^o. Tentukan besarnya sudut deviasi yang terjadi pada prisma tersebut!
3. Seberkas cahaya monokromatik dijatuhkan tegak lurus sebuah celah tunggal yang lebarya 0.4 mm. Sebuah layar diletakkan di belakang celah sejauh 40 cm. Apabila garis gelap pertama berjarak 0,56 mm dari terang pusat, hitunglah panjang gelombang cahaya yang dipakai!
4. Sebuah kisi yang memiliki 3.000 garis tiap cm digunakan untuk menentukan panjang gelombang cahaya. Sudut antara garis terang pusat dan garis pada orde pertama adalah 8^o ($\sin 8^o = 0{,}140$). Tentukan panjang gelombang cahaya tersebut!
5. Dua buah celah sempit terpisah pada jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Sebuah layar diletakkan 1 meter dari celah. Jika garis terang orde ke-3 terletak pada layar yang berjarak 7,5 mm dari terang pusat, tentukan panjang gelombang cahaya yang digunakan!

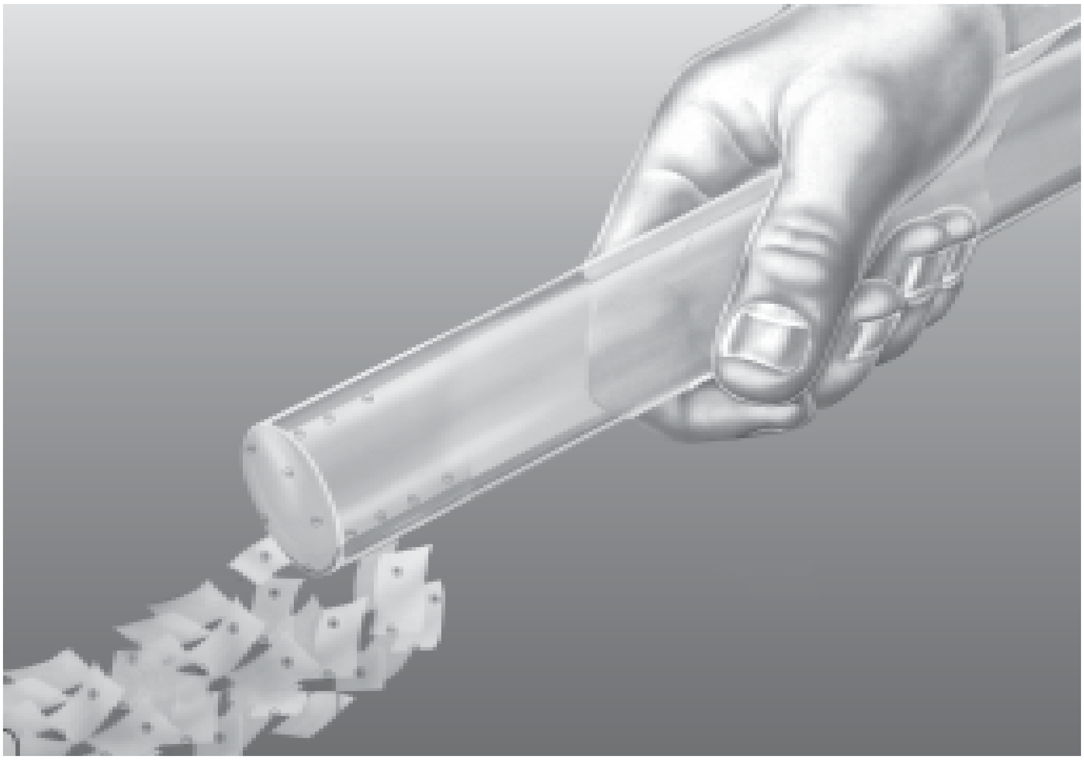
Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, kalian seharusnya memahami tentang :

1. pembiasan cahaya pada prisma,
2. gejala dan ciri-ciri gelombang cahaya, dan
3. konsep dan prinsip gelombang cahaya dalam teknologi.

Apabila ada hal-hal yang belum kalian pahami, pelajari kembali sebelum kalian melanjutkan pada bab berikutnya.

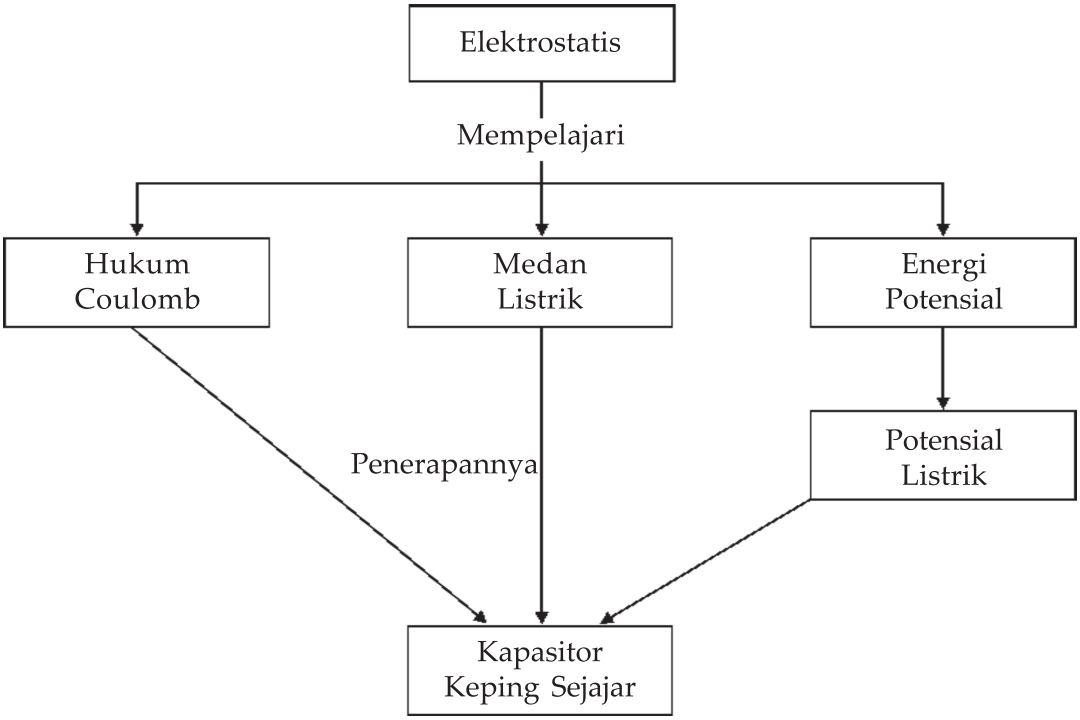
Bab III
Elektrostatika



Sumber : HDI Energi dan Fisika

Benda menjadi bermuatan karena gesekan atau usapan, yang menyebabkan suatu benda kehilangan sebagian elektronnya dan menjadi bermuatan positif.
Sebatang tongkat plastik dapat menarik kertas setelah sebelumnya digosokkan pada kulit bulu, elektron kulit bulu berpindah ke batang plastik sehingga plastik menjadi bermuatan negatif.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik, dan
2. menerapkannya prinsip-prinsip elektrostatis pada keping sejajar.

Motivasi Belajar

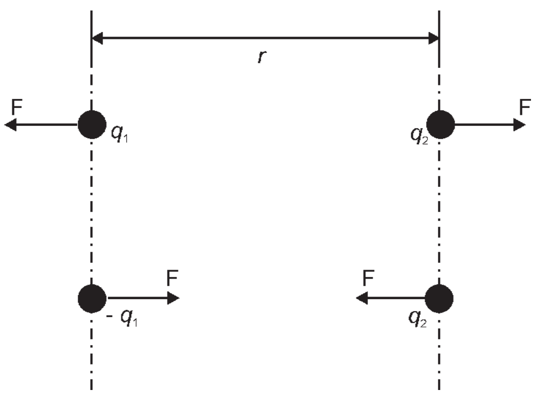
Adakalanya benda biasa memperagakan tenaga yang tampaknya luar biasa: sebatang tongkat plastik dapat menarik kertas seperti magnet menarik besi. Penyebab efek luar biasa ini ialah listrik statis (elektrostatika). Apa sebenarnya listrik statis itu? Apa yang menyebabkannya? Agar kalian memahaminya, maka pelajarilah materi bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

elektrostatika, gaya Coulomb, medan listrik, kuat medan listrik, generator, potensial listrik, kapasitor

Sebagaimana yang telah kita pelajari di kelas IX, *listrik statis* terjadi akibat interaksi antara partikel-partikel bermuatan listrik, elektron negatif, dan proton positif pada atom. Muatan listrik yang sejenis tolak-menolak, sedangkan muatan listrik tak sejenis tarik-menarik. Pada bab ini kita akan kembali mempelajari tentang listrik statis (elektrostatis) lebih lanjut mengenai hukum Coulomb, kuat medan listrik, energi potensial listrik, potensial listrik, dan kapasitor.

A. Hukum Coulomb



Gambar 3.1 *Gaya Coulomb*

Perhatikan **Gambar 3.1** yang menggambarkan dua buah benda bermuatan listrik q_1 dan q_2 terpisah pada jarak r. Apabila kedua benda bermuatan listrik yang sejenis, kedua benda tersebut akan saling tolak-menolak dengan gaya sebesar F dan jika muatan listrik pada benda berlainan jenis, akan tarik-menarik dengan gaya sebesar F.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh seorang ahli Fisika Prancis, **Charles de Coulomb** (1736-1806) disimpulkan bahwa: *besarnya gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua benda bermuatan listrik (yang kemudian disebut gaya Coulomb) berbanding lurus dengan muatan masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda tersebut.*

Pernyataan inilah yang kemudian dikenal dengan hukum Coulomb yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\overline{F} = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \qquad .... (3.1)$$

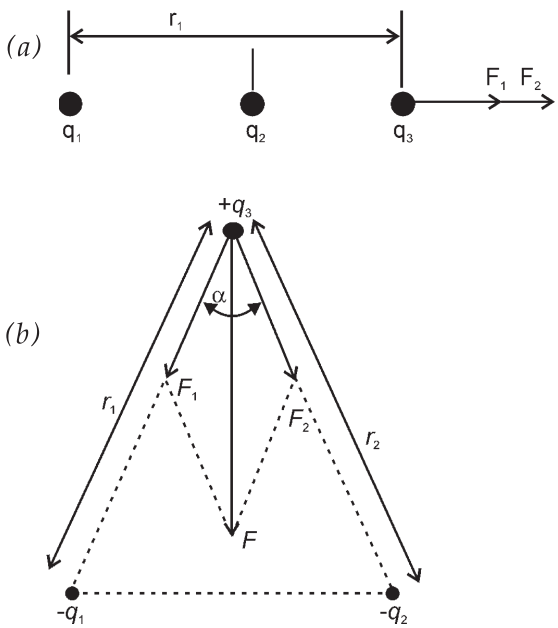
di mana :

$\overline{F}$ = gaya tarik-menarik atau tolak-menolak/gaya Coulomb (Newton)

k = bilangan konstanta = $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ = 9. 10^9 N m^2/C^2

q_1, q_2 = muatan listrik pada benda 1 dan benda 2 (Coulomb/C)

r = jarak pisah antara kedua benda (m)



***Gambar 3.2** Gaya Coulomb untuk tiga muatan titik*

Gaya Coulomb termasuk besaran vektor. Apabila pada sebuah benda bermuatan dipengaruhi oleh benda bermuatan listrik lebih dari satu, maka besarnya gaya Coulomb yang bekerja pada benda itu sama dengan jumlah vektor dari masing-masing gaya Coulomb yang ditimbulkan oleh masing-masing benda bermuatan tersebut. Misalnya untuk tiga buah muatan listrik seperti **Gambar (3.2a)** dan **Gambar (3.2b)**.

Besarnya gaya Coulomb yang dialami oleh q_3 pada **Gambar (3.2a)** $F = F_1 + F_2$

$$\overline{F} = k\frac{q_1 \cdot q_3}{r_1^2} + k\frac{q_2 \cdot q_3}{r_2^2} \qquad .... (3.2)$$

di mana :

$\overline{F}_1$ = gaya Coulomb pada q_3 akibat yang ditimbulkan oleh q_1

$\overline{F}_2$ = gaya Coulomb pada q_3 akibat yang ditimbulkan oleh q_2

$\overline{F}$ = gaya Coulomb pada q_3 akibat muatan q_1 dan q_2

Gaya Coulomb pada muatan q_3 pada **Gambar (3.2b)** adalah $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$.

Karena letak ketiga muatan tidak dalam satu garis lurus, maka besarnya nilai F dihitung dengan :

$$\bar{F} = \sqrt{(F_1)^2 + (F_2)^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha} \qquad \text{.... (3.3)}$$

dengan α adalah sudut yang diapit antara $\bar{F}_1$ dan $\bar{F}_2$.

Contoh Soal

1. Dua buah muatan listrik masing-masing besarnya 3×10^{-6} C dan 6×10^{-6} C terpisah pada jarak 3 cm. Tentukan besarnya gaya listrik yang bekerja pada masing-masing muatan tersebut!

   Penyelesaian :

   Dari persamaan (3.1)

   $$\bar{F} = k\frac{q_1 . q_2}{r^2}$$

   $$= 9 \times 10^9 \left(\frac{(3 \times 10^{-6})(6 \times 10^{-6})}{(3 \times 10^{-2})^2} \right)$$

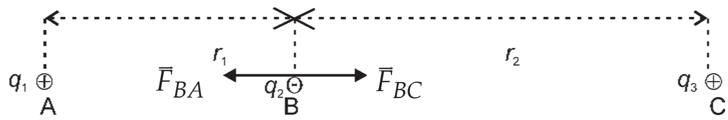
   $$= 9 \times 10^9 \left(\frac{18 \times 10^{-12}}{9 \times 10^{-4}} \right)$$

   $$= 1{,}8 \times 10^2 \text{ N}$$

   Jadi, besarnya gaya listrik yang bekerja pada masing-masing muatan adalah $1{,}8 \times 10^2$ N.

2. Tiga buah benda A, B, dan C masing-masing bermuatan listrik sebesar 3×10^{-8} C, $- 6 \times 10^{-8}$ C, dan 2×10^{-8} C yang terletak dalam satu garis lurus, jika jarak AB = 3 cm dan BC = 6 cm. Tentukan besarnya gaya Coulomb yang dialami oleh muatan di titik B!

Penyelesaian :



$$\overline{F}_B = \overline{F}_{BC} - \overline{F}_{BA}$$

$$= k\frac{q_1 \cdot q_3}{r_1^2} - k\frac{q_2 \cdot q_3}{r_2^2}$$

$$= 9 \times 10^9 \left(\frac{(6 \times 10^{-8})(2 \times 10^{-8})}{(6 \times 10^{-2})^2}\right) - 9 \times 10^9 \left(\frac{(3 \times 10^{-8})(6 \times 10^{-8})}{(3 \times 10^{-2})^2}\right)$$

$$= 9 \times 10^9 \left(\frac{(12 \times 10^{-16})}{(36 \times 10^{-4})}\right) - 9 \times 10^9 \left(\frac{(18 \times 10^{-16})}{(9 \times 10^{-4})}\right)$$

$$= 3 \times 10^{-3} - 18 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$$= -15 \times 10^{-3} \text{ N}$$

$= -1{,}5 \times 10^{-2}$ N (tanda negatif menunjukkan arah gaya ke kiri yaitu mengarah ke titik A).

Jadi, besarnya gaya Coulomb yang dialami muatan di titik B adalah $1{,}5 \times 10^{-2}$ N.

Wawasan Produktivitas : Daya Saing

Buatlah rancangan suatu alat percobaan dengan memanfaatkan benda-benda yang ada di sekeliling kita untuk membuktikan gaya Coulomb. Buatlah langkah-langkah kerja dari alat tersebut beserta rincian biaya yang digunakan. Presentasikan prinsip kerja alat tersebut di depan kelas!

Soal Latihan :

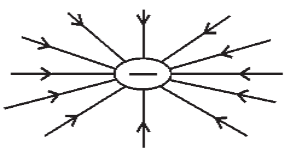
1. Dua buah muatan listrik masing-masing q_1 = +8 μC dan q_2 = -12 μC terpisah pada jarak 10 cm. Tentukan berapa besarnya gaya Coulomb yang dialami oleh muatan q_3 = +4 C yang terletak pada jarak 4 cm dari q_1 dan 6 cm dari q_2!

2. Dua muatan listrik q_1 = +8 x 10^{-9} C dan q_2 = + 16 x 10^{-9} C terpisah pada jarak 12 cm. Tentukan di mana muatan q_3 harus diletakkan agar gaya Coulomb pada muatan q_3 sama dengan nol!
3. Sebuah segitiga sama sisi ABC mempunyai panjang sisi 6 cm. Apabila pada masing-masing titik sudut segitiga berturut-turut terdapat muatan listrik sebesar q_A = +8 C, q_B = -9 C, dan q_C = +3 C, tentukan besarnya gaya Coulomb pada titik sudut C!

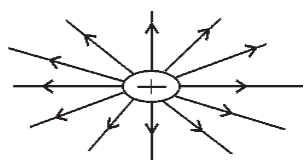
B. Medan Listrik dan Kuat Medan Listrik

Medan listrik didefinisikan sebagai ruangan di sekitar benda bermuatan listrik, di mana jika sebuah benda bermuatan listrik berada di dalam ruangan tersebut akan mendapat gaya listrik (gaya Coulomb). Medan listrik termasuk medan vektor, sehingga untuk menyatakan arah medan listrik dinyatakan sama dengan arah gaya yang dialami oleh muatan positif jika berada dalam sembarang tempat di dalam medan tersebut. Arah medan listrik yang ditimbulkan oleh benda bermuatan positif dinyatakan keluar dari benda, sedangkan arah medan listrik yang ditimbulkan oleh benda bermuatan negatif dinyatakan masuk ke benda.

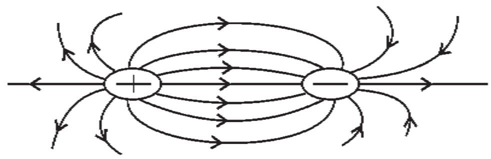
Untuk menggambarkan medan listrik digunakan *garis-garis gaya listrik*. Garis-garis gaya listrik yaitu garis lengkung yang dibayangkan merupakan lintasan yang ditempuh oleh muatan positif yang bergerak dalam medan listrik. Garis gaya listrik tidak mungkin akan berpotongan, sebab garis gaya listrik merupakan garis khayal yang berawal dari benda bermuatan positif dan akan berakhir di benda yang bermuatan negatif. **Gambar (3.3)** menggambarkan garis-garis gaya listrik di sekitar benda bermuatan listrik.



(a) Muatan negatif

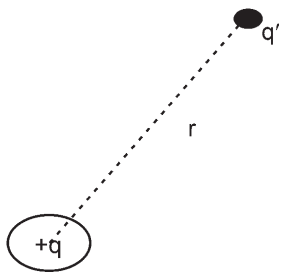


(b) Muatan positif



(c) Antara muatan positif dan muatan negatif

Gambar 3.3 *Garis-garis gaya listrik*



***Gambar* 3.4** *Kuat medan listrik yang ditimbulkan muatan positif (+q)*

Kuat medan listrik di suatu titik dalam medan listrik didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan listrik di titik itu. Kuat medan listrik dinyatakan dengan lambang E. Untuk menyatakan kuat medan di suatu titik dalam medan listrik perhatikan **Gambar (3.4)**, menggambarkan suatu benda bermuatan q yang menimbulkan medan listrik di sekitarnya. Kita tinjau suatu titik P yang berada pada jarak r dari q. Untuk menentukan kuat medan listrik di titik P, kita letakkan sebuah muatan penguji sebesar q'. Besarnya kuat medan di titik P dapat dituliskan :

$$\vec{E_P} = \frac{\vec{F}}{q'} = \left(\frac{k\frac{q \cdot q'}{r^2}}{q'} \right) = k\frac{q}{r^2} \qquad \text{.... (3.4)}$$

di mana :

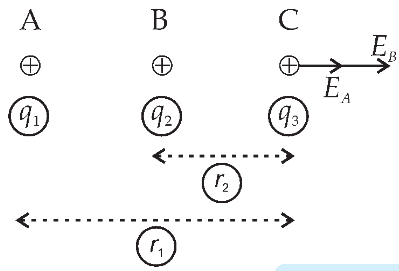
$\overline{E_p}$ = kuat medan di titik P (Newton/Coulomb)

k = Konstanta = 9.10^9 N m^2 C^{-2}

q = muatan listrik penimbul medan (C)

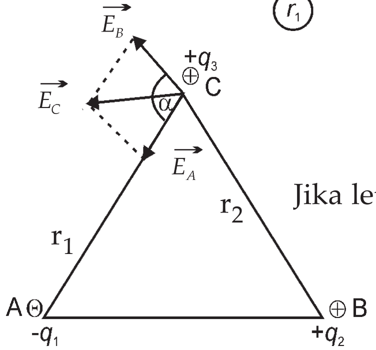
r = jarak antara titik P ke muatan q (m)

Demikian juga medan listrik termasuk besaran vektor, seperti halnya gaya listrik. Apabila pada suatu titik dipengaruh oleh medan listrik yang ditimbulkan oleh lebih dari satu benda bemuatan, maka kuat medan listrik di tempat itu sama dengan jumlah vektor dari masing-masing kuat medan.



Apabila letak benda berada dalam satu garis lurus, maka kuat medan listrik pada titik C adalah : $E_C = E_A + E_B$

$$\vec{E_C} = k\frac{q_1}{r_1^2} + k\frac{q_2}{r_2^2} \qquad \text{.... (3.5)}$$



Jika letak benda tidak dalam satu garis lurus.

Maka kuat medan listrik di titik C adalah : $E_C = E_A + E_B$

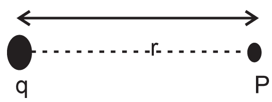
$$E_C = \sqrt{E_A^{\ 2} + E_B^{\ 2} + 2E_A.E_B \cos \alpha} \qquad \text{.... (3.6)}$$

di mana sudut yang diapit antara $\overrightarrow{E_A}$ dan $\overrightarrow{E_B}$ adalah α.

Contoh Soal

1. Hitunglah kuat medan listrik di titik P yang berjarak 3 cm dari muatan +8 × 10^{-9} C!

   Pnyelesaian :

   $$Ep = k\frac{q}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(8 \times 10^{-9})}{(3 \times 10^{-2})^2} = 8 \times 10^4 \text{ NC}^{-1}$$

   Jadi, besarnya kuat medan listrik di titik P adalah 8×10^4 NC^{-1}.

2. Dua buah benda A dan B mempunyai muatan listrik masing-masing +4 × 10^{-8} C, dan +16 × 10^{-8} C terpisah pada jarak 6 cm. Tentukan letak titik P yang mempunyai kuat medan listrik = 0!

   Penyelesaian :

   Letak titik P berada di antara kedua muatan tersebut, tidak mungkin berada di luar kedua benda tersebut. Sebab bila di antara kedua benda tersebut, arah medan listrik titik P berlawanan arah, sehingga resultannya bisa akan menjadi nol, sedangkan di luar kedua benda arah medan listriknya searah, sehingga tidak mungkin akan sama dengan nol.

   Misal titik P terletak pada jarak x dari A, maka :

   $$\overrightarrow{E_P} = \overrightarrow{E_A} - \overrightarrow{E_B} = 0$$

   $$\overrightarrow{E_A} = \overrightarrow{E_B}$$

   $$k\frac{q_A}{x^2} = k\frac{q_B}{(6-x)^2}$$

   $$\frac{4 \times 10^{-8}}{x^2} = \frac{16 \times 10^{-8}}{(6-x)^2}$$

$$\frac{1}{x^2} = \frac{4}{36 - 12x + x^2}$$

$36 - 12x + x^2 = 4x^2$

$3x^2 + 12x - 36 = 0$

$(x + 6)(x - 2) = 0$

$x = -6$ dan $x = 2$

Jadi letak titik P berada 2 cm di sebelah kanan A atau 4 cm di sebelah kiri B.

Keingintahuan : Mencari Informasi

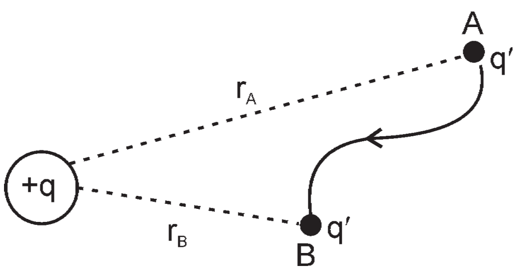
Untuk mendapat medan listrik atau potensial listrik yang cukup tinggi pada elektrostatis dapat digunakan suatu alat yang disebut generator Van de Graf atau generator elektrostatis yang secara komersial dapat digunakan untuk mempercepat proton sampai mencapai energi sebesar 10 MeV. Proton berenergi tinggi ini dapat digunakan untuk menembah inti atom stabil sehingga menjadi inti atom radioisotop. Cobalah kalian cari dari literatur atau dari internet tentang generator Van De Graf (Generator elektrostatis) mengenai bagian-bagian dan prinsip kerja dari alat tersebut!

Soal Latihan :

1. Hitunglah kuat medan listrik di titik P yang berjarak 30 cm dari sebuah muatan titik sebesar 5×10^{-9} C!
2. Sebuah segitiga ABC sama sisi dengan panjang sisi 20 cm. Apabila pada masing-masing titik sudut segitiga ABC terdapat muatan berturut-turut +2 μC, +3 μC, dan +4 μC. Tentukan besarnya medan listrik pada titik C!
3. Dua buah muatan listrik masing-masing besarnya +3 μC dan -5 μC terpisah pada jarak 40 cm. Di manakah letak titik P yang mempunyai kuat medan listrik sama dengan nol!

C. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik

Pada pelajaran di kelas XI, telah dipelajari tentang usaha dan perubahan energi. Untuk memindahkan/menggerakkan sebuah benda diperlukan usaha. Usaha yang dilakukan sama dengan perubahan energi kinetik atau perubahan energi potensial benda tersebut. Begitu juga halnya untuk memindahkan muatan listrik dalam medan listrik diperlukan usaha, usaha yang dilakukan sama besarnya dengan perubahan energi potensial. Besarnya energi yang diperlukan untuk memindahkan muatan bergantung pada besar muatan yang dipindahkan dan jarak perpindahannya. Untuk menjelaskan pengertian energi potensial listrik dan potensial listrik, perhatikan **Gambar 3.5.** Gambar tersebut menggambarkan medan listrik yang ditimbulkan muatan listrik q, untuk memindahkan muatan sebesar q' dari titik A yang berjarak r_A ke titik B yang berjarak r_B dari q. Usaha yang diperlukan adalah :



***Gambar* 3.5** *Medan listrik yang ditimbulkan muatan listrik (q)*

$$W_{AB} = \int_{r_A}^{r_B} F\,dr$$

$$= \int_{r_A}^{r_B} kqq' \frac{dr}{r^2}$$

$$= kqq' \int_{r_A}^{r_B} \frac{1}{r^2} dr$$

$$= -\,kqq' \frac{1}{r}\Big|_{r_A}^{r_B}$$

$$W_{AB} = -\,kqq'\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A}\right) = (E_P)_B - (E_P)_A \qquad \text{.... (3.7)}$$

Dalam hal ini energi potensial listrik bertanda negatif, yang berarti makin jauh dari muatan listrik penimbul medan makin besar energi potensialnya. Besarnya energi potensial listrik di jauh tak terhingga sama dengan nol. Apabila titik A berada di jauh tak terhingga r_A, maka E_{PA} = 0 dan persamaan (3.7) menjadi :

$$(E_P)_B - 0 = kqq'\left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{\infty}\right)$$

$$(E_P)_B = k\frac{qq'}{r_B}$$

Dalam hal ini r_B dapat sembarang jarak, maka :

$$E_P = k\frac{qq'}{r_B} \quad \text{.... (3.8)}$$

dengan :

E_P = energi potensial di suatu titik P dalam medan listrik (Joule)

k = Konstanta = 9×10^9 N m^2C^{-2}

q = muatan listrik penimbul medan

q' = muatan listrik penguji

r = jarak titik P ke muatan q

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa energi potensial listrik di suatu titik (P) dalam medan listrik didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik (q') dari jauh tak terhingga ke titik itu.

Energi potensial per satuan muatan positif disebut potensial listrik,yang diberi lambang V. Potensial listrik termasuk sebagai besaran skalar.

Jadi potensial listrik pada suatu titik dalam medan listrik yang berjarak r dari q dinyatakan :

$$V_P = \frac{E_p}{q'} = k\frac{q}{r} \quad \text{atau} \quad E_P = q\,V \quad \text{.... (3.9)}$$

dengan :

V_P = potensial listrik di titik P (Joule/Coulomb = volt)

E_P = energi potensial listrik (Joule)

q = muatan listrik penimbul medan (Coulomb)

r = jarak titik P dari q

k = konstanta = 9.10^9 Nm^2C^{-2}

Life Skills : Kecakapan Sosial

Apabila kalian perhatikan pada motor-motor listrik yang mempunyai daya besar selalu diperlengkapi dengan sebuah kondensator atau kapasitor. Coba diskusikan dengan teman-temanmu apa fungsi dari kondensator yang terpasang pada motor listrik tersebut!

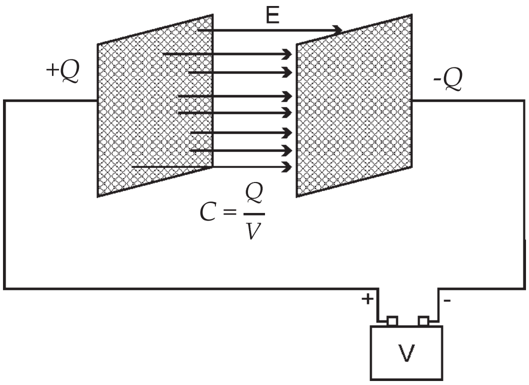
Soal Latihan :

1. Potensial di suatu titik yang berjarak r dari muatan Q adalah 600 volt. Intensitas medan di titik tersebut 400 N/c. Jika $k = 9 \times 10^9$ N m^2/c^2, maka besar muatan Q adalah ....
2. Untuk memindahkan muatan positif yang besarnya 10 Coulomb dari suatu titik yang potensialnya 10 volt ke suatu titik lain dengan potensialnya 60 volt diperlukan usaha sebesar ....
3. Titik A bermuatan 5 μC, berada sejauh 1 m dari titik B yang bermuatan 3 μC. Besar potensial listrik di tengah-tengah antara A dan B sebesar ....
4. Dua buah titik A dan B yang terpisah pada jarak 3 cm, masing-masing bermuatan $+10^{-7}$ C dan -10^{-6} C. Jarak kedua titik yang mempunyai potensial nol adalah ....

D. Kapasitor

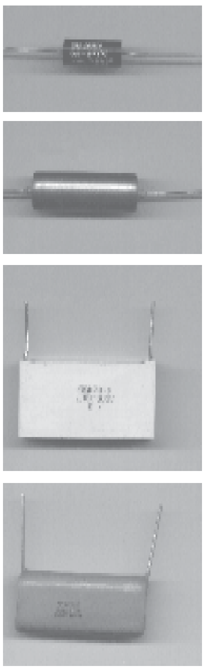
1. Kapasitas Kapasitor

Kapasitor atau sering juga disebut dengan sebutan *kondensator* merupakan dua pelat konduktor yang diletakkan sejajar, diberi muatan listrik yang sama besar, tetapi berlainan jenisnya. Pada dasarnya kapasitor banyak jenisnya, pada kesempatan ini kita hanya akan mempelajari tentang kapasitor keping sejajar. Dalam pasaran alat-alat elektronika banyak



Gambar 3.6 Kapasitor keping sejajar

dijumpai kapasitor kertas, elektrolit, keramik, mika, dan sebagainya. Pada dasarnya kapasitor itu adalah jenis kapasitor keping sejajar yang untuk memperbesar nilai kapasitas kapasitor di antara kedua keping itu disisipkan bahan lain, misalnya kertas, keramik, mika, atau zat elektrolit. Di dalam kapasitor bila dihubungkan dengan sumber tegangan listrik maka dalam kapasitor itu akan menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Kemampuan kapasitor untuk menyimpan energi listrik disebut *kapasitas kapasitor* yang diberi lambang C yang nilainya dapat dinyatakan dengan *perbandingan antara banyaknya muatan listrik yang tersimpan dalam kapasitor dengan beda potensial yang timbul pada ujung-ujung kapasitor tersebut* dan dirumuskan :



Sumber : www.Arrakie.Es-igapop-capasitros.hatm

Gambar 3.7 Beberapa jenis kapasitor

$$C = \frac{Q}{V} \qquad \text{.... (3.10)}$$

dengan :

C = kapasitas kapasitor (farad diberi lambang F)

Q = muatan listrik yang tersimpan dalam kapasitor (Coulomb diberi lambang C)

V = beda potensial antara keping kapasitor (volt)

Besarnya kapasitas kapasitor keping sejajar yang memiliki luas penampang keping yang sama berbanding lurus dengan luas penampang keping dan berbanding terbalik dengan jarak antara kedua keping dan tergantung pada bahan dielektrikum yang diselipkan di antara kedua keping tersebut, yang dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$C = \frac{\varepsilon_o A}{d} \qquad \text{.... (3.11)}$$

atau

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \qquad \text{.... (3.12)}$$

di mana $= \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o$

dengan :

C = kapasitas kapasitor

A = luas penampang keping kapasitor

d = jarak antara kedua keping kapasitor

ε_o = konstanta permitivitas ruang hampa

$= 8{,}85 \times 10^{-12}\ C^2N^{-1}m^{-2}$

ε_r = permitivitas relatif bahan

ε = permitivitas bahan

Contoh Soal

Sebuah kapasitor terbuat dari dua lempeng konduktor yang masing-masing luasnya 12.10^{-3} m^2 dan terpisah pada jarak 2 mm. Hitunglah kapasitas kapasitor tersebut jika di antara kedua keping tersebut berisi :

a. udara

b. zat dengan permitivitas relatif = 50

Penyelesaian :

a. $C = \dfrac{\varepsilon_o A}{d} = \dfrac{8{,}85.10^{-12} \times 12.10^{-3}}{2.10^{-3}}$

$= 53{,}1.10^{-12}$ F = 53,1 pF

Jadi, kapasitas kapasitor berisi udara adalah 53,1 pF.

b. $C = \dfrac{\varepsilon A}{d} = \dfrac{\varepsilon_o \varepsilon_r A}{d}$

$= \dfrac{8{,}85.10^{-12} \times 50 \times 12.10^{-3}}{2.10^{-3}}$

= 2655 pF = 2,655 nF

Jadi, kapasitas kapasitor dengan permitivitas relatifnya 50 = 2,655 nF.

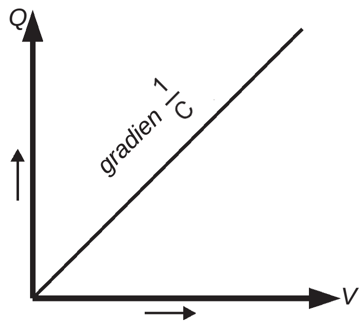
Keingintahuan : Mencari Informasi

Pada zaman modern saat ini waktu dan jarak tidak lagi merupakan penghalang bagi kepentingan manusia, sebab perkembangan di bidang teknologi informasi dan transportasi sudah maju sedemikian pesatnya. Misalnya dari Yogyakarta ke Jakarta dengan pesawat dapat ditempuh kurang dari satu jam, demikian suatu peristiwa yang terjadi di Amerika Serikat yang hanya dalam waktu hitungan detik saja peristiwa itu sudah bisa didengar oleh orang Indonesia. Akan tetapi dari perkembangan dunia teknologi informasi (gelombang radio) diawali dengan ditemukan adanya osilator yaitu alat pembangkit getaran listrik yang digunakan dalam alat transmiter radio. Pada prinsipnya rangkaian osilator merupakan rangkaian paralel antara kapasitor dengan induktor/kumparan. Cobalah kalian cari model-model osilator sederhana melalui buku-buku literatur atau internet, bagaimana prinsip kerja dari osilator tersebut?

Soal Latihan :

1. Sebuah kapasitor tersusun atas dua lempeng konduktor yang luasnya masing-masing 5.10^{-4} m^2 dan terpisah pada jarak 0,8 mm. Hitunglah kapasitas kapasitor tersebut apabila di antara kedua lempeng konduktor tersebut terdapat :
   a. udara,
   b. bahan dielektrik dengan permitivitas relatif = 80!
2. Sebuah kapasitor memiliki kapasitas sebesar 32 mF. Apabila medium di antara kedua keping tersebut adalah udara, hitunglah berapa kapasitas kapasitornya apabila :
   a. luas keping diperbesar menjadi 5 kalinya semula,
   b. jarak kedua keping diperbesar 16 kali semula,
   c. ruang di antara kedua keping diisi bahan dielektrikum dengan ε_r = 50!
3. Kapasitor A dengan bahan dielektrik yang memiliki permitivitas 50, sedangkan kapasitor B mempunyai luas keping empat kali luas keping kapasitor A , jarak antar-kedua keping dua kali lebih besar dari kapasitor A dan bahan dielektrikum kapasitor B tersebut memiliki permitivitas 80. Tentukan perbandingan kapasitas kapasitor A dan B tersebut!

2. Energi dalam Kapasitor



Gambar 3.8 *Grafik hubungan muatan kapasitor dan tegangan*

Kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan akan menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. *Besarnya energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor sama dengan usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan listrik dari sumber tegangan ke dalam kapasitor tersebut*. Perhatikan **Gambar (3.8)** menggambarkan grafik pengisian kapasitor dari keadaan kosong.

Usaha yang diperlukan untuk mengisi muatan listrik dalam kapasitor dapat dinyatakan dalam grafik hubungan antara Q dan V yaitu $W = \frac{1}{2} QV$.

Dari persamaan (3.10) diperoleh bahwa $Q = CV$ maka :

$$W = \frac{1}{2} CVV = \frac{1}{2} CV^2 \quad \text{.... (3.13)}$$

dengan :

W = energi yang tersimpan di dalam kapasitor (joule)

C = kapasitas kapasitor (F)

V = beda potensial antara kedua keping kapasitor (volt)

Contoh Soal

Sebuah kapasitor yang mempunyai kapasitas sebesar 400 μF dipasang pada tegangan 100 Volt. Berapa Joule energi listrik yang tersimpan pada kapasitor tersebut?

Penyelesaian :

$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2}\ 4.10^{-4}\ (100)^2 = 2$ Joule

Soal Latihan :

1. Sebuah kapasitor jika dipasang pada tegangan sebesar 12 volt, maka energi listrik yang tersimpan pada kapasitor tersebut adalah sebesar $3{,}6.10^{-6}$ joule. Tentukan berapa kapasitas kapasitor tersebut! (C =25 μF)

2. Sebuah kapasitor jika dihubungkan dengan sumber tegangan 25 volt dapat menyimpan energi listrik sebesar 1,25 Joule. Berapa joule energi yang tersimpan pada kapasitor tersebut jika dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar 10 Volt? (W = 0,02 Joule)

3. Susunan Kapasitor

Bahasa Elektronika

Awalan untuk menunjukkan pecahan atau perkalian satuan

p = piko (sepertriliun)

n = nano (sepermiliar)

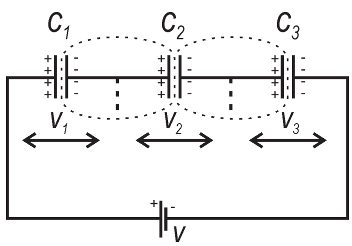
μ = mikro (seperjuta)

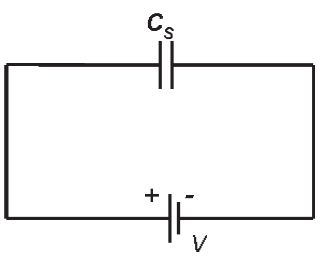
m = mili (seperseribu)

Di pasaran banyak kita jumpai kapasitor yang nilai kapasitasnya bermacam-macam, dari yang kecil yaitu dalam ukuran piko farad (pF), nano farad (nF), dan mikro farad (μF). Akan tetapi kadang-kadang yang ada di pasaran tidak cocok dengan yang kita butuhkan, sehingga kita dapat menyusun kapasitor itu sedemikian rupa memiliki kapasitas yang kita butuhkan. Dalam rangkaian listrik ataupun rangkaian elektronika, kapasitor dapat disusun dalam dua cara, yaitu susunan seri dan paralel, tetapi dapat juga disusun gabungan susunan seri dan paralel.

a. *Susunan Seri*

Susunan seri diperoleh dengan saling menghubungkan elektroda-elektroda (kaki-kaki kapasitor) secara berurutan seperti tampak pada **Gambar (3.9)**. Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing C_1, C_2, dan C_3 disusun seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan yang mempunyai beda potensial V. Ketiga buah kapasitor itu bisa diganti dengan sebuah kapasitor yang dapat kita sebut *kapasitas pengganti hubungan seri* dan diberi lambang C_s. Besarnya kapasitas kapasitor pengganti hubungan seri dapat dicari sebagai berikut.





Gambar 3.9 *Kapasitor disusun seri*

Pada kapasitor yang dihubungkan seri, besarnya muatan yang terkandung pada tiap kapasitor adalah sama, karena muatan pada tiap keping kapasitor yang saling berdekatan saling meniadakan. Oleh karena itu, pada kapasitor yang disusun seri berlaku : $V_1 = \frac{Q}{C_1}$, $V_2 = \frac{Q}{C_2}$, $V_3 = \frac{Q}{C_3}$ dan $V = \frac{Q}{C_s}$.

Sedangkan tegangan sumber V sama dengan jumlah tegangan pada masing-masing kapasitor. Apabila masing-masing beda potensial kapasitor itu berturut-turut V_1, V_2, dan V_3 maka

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad .... (3.14)$$

Persamaan (3.14) menyatakan hubungan nilai kapasitas kapasitor pengganti susunan seri terhadap kapasitas kapasitor penyusunnya. Berdasarkan persamaan ini terlihat bahwa nilai kapasitas kapasitor pengganti hubungan seri selalu lebih kecil dari kapasitas kapasitor penyusunnya.

Contoh Soal

Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 μF, 12 μF, dan 4 μF dihubungkan secara seri kemudian dipasang pada sumber tegangan sebesar 24 Volt.

Hitunglah :

a. kapasitas kapasitor susunan seri tersebut,
b. muatan total pada kapasitor,
c. muatan masing-masing kapasitor, dan
d. tegangan pada masing-masing kapasitor!

Penyelesaian :

a. $\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{12} + \frac{1}{4} = \frac{4+1+3}{12} = \frac{8}{12}$ maka $C_s = \frac{12}{8} = 1{,}5$ μF

b. $Q_t = C_s \times V = 1{,}5 \times 10^{-6} \times 24 = 3{,}6 \times 10^{-5}$ C

c. $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_t = 3{,}6 \times 10^{-5}$ C

d. $V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{3{,}6.10^{-5}}{3.10^{-6}} = 12$ Volt

$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{3{,}6.10^{-5}}{12.10^{-6}} = 3$ Volt

$V_3 = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{3{,}6.10^{-5}}{4.10^{-6}} = 9$ Volt

Soal Latihan :

1. Empat buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 4 μF, 8 μF, 16 μF, dan 4 μF disusun seri kemudian dipasang pada sumber tegangan 32 Volt.

   Hitunglah :

   a. kapasitas kapasitor susunan seri tersebut,
   b. muatan total pada kapasitor,
   c. muatan masing-masing kapasitor, dan
   d. tegangan pada masing-masing kapasitor!

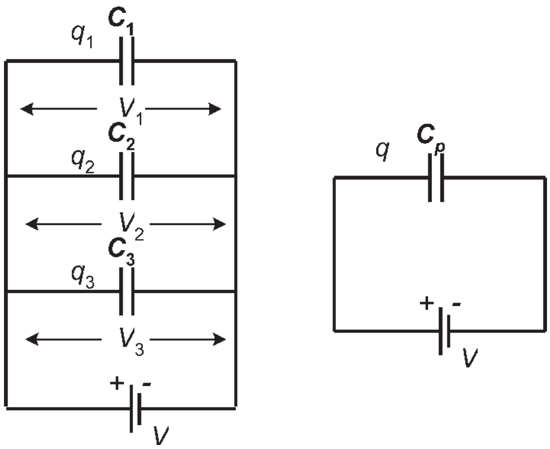
2. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya sebesar 12 μF, 24 μF, dan 6 μF disusun seri kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan 12 Volt.

   Hitunglah :

   a. kapasitas kapasitor susunan seri tersebut,
   b. muatan total pada kapasitor,
   c. muatan masing-masing kapasitor, dan
   d. tegangan pada masing-masing kapasitor!

b. Susunan Paralel

Beberapa kapasitor disusun paralel apabila keping-keping kapasitor yang bermuatan sejenis digabungkan menjadi satu, yaitu kutub positif dijadikan satu dihubungkan dengan kutub positif sumber tegangan dan kutub negatif dijadikan satu dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan seperti tampak pada **Gambar (3.10).** Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing C_1, C_2, dan C_3 disusun paralel dan dihubungkan dengan sumber tegangan yang mempunyai



Gambar 3.10 *Kapasitor disusun paralel*

beda potensial V. Ketiga buah kapasitor itu dapat diganti dengan sebuah kapasitor yang dapat kita sebut *kapasitor pengganti hubungan paralel* dan diberi lambang C_p. Besarnya kapasitas kapasitor pengganti hubungan paralel dapat dicari sebagai berikut.

Pada masing-masing kapasitor yang dihubungkan paralel memiliki beda potensial yang sama karena pada masing-masing kapasitor terhubung langsung dengan sumber tegangan, akan tetapi muatan pada masing-masing kapasitor berbeda. Besarnya muatan total susunan kapasitor tersebut merupakan jumlah masing-masing muatan dalam kapasitor penyusunnya. Misalkan muatan listrik pada masing-masing kapasitor itu Q_1, Q_2, dan Q_3 serta beda potensial pada masing-masing kapasitor itu V_1, V_2 dan V_3 maka berlaku :

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ dan $V_1 = V_2 = V_3 = V$

Besarnya muatan masing-masing kapasitor berturut turut

$Q_1 = C_1V$, $Q_2 = C_2V$, $q_3 = C_3V$ dan $Q = C_pV$

$C_pV = C_1V + C_2V + C_3V$

$C_pV = (C_1 + C_2 + C_3)\ V$

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 \qquad \text{.... (3.14)}$$

Persamaan (2.14) menyatakan hubungan nilai kapasitas kapasitor pengganti susunan paralel terhadap kapasitas kapasitor penyusunnya. Berdasarkan persamaan ini terlihat bahwa nilai kapasitas kapasitor pengganti hubungan paralel selalu lebih besar dari kapasitas kapasitor penyusunnya.

Contoh Soal

Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 4 μF, 6 μF, dan 12 μF disusun paralel kemudian susunan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar 16 Volt.

Hitunglah :

a. kapasitas kapasitor susunan paralel tersebut,
b. muatan total yang tersimpan pada kapasitor,
c. tegangan pada masing-masing kapasitor, dan
d. muatan pada masing-masing kapasitor!

Penyelesaian :

a. $C_p = C_1 + C_2 + C_3 = 4 + 6 + 12 = 22\ \mu F$

b. $Q_t = C_p \times V = 22.10^{-6} \times 16 = 3{,}52 \times 10^{-4}$ Joule

c. $V_1 = V_2 = V_3 = V = 16$ Volt

d. $Q_1 = C_1 \times V_1 = 4.10^{-6} \times 16 = 6{,}4 \times 10^{-5}$ Joule

$Q_2 = C_2 \times V_2 = 6.10^{-6} \times 16 = 9{,}6 \times 10^{-5}$ Joule

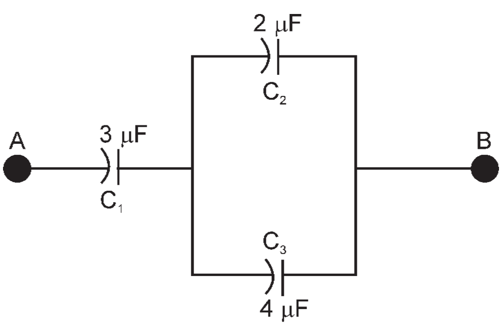
$Q_3 = C_3 \times V_3 = 12.10^{-6} \times 16 = 1{,}92 \times 10^{-4}$ Joule

Soal Latihan :

1. Dua buah kapasitor masing-masing besarnya 6 μF dan 12 μF disusun secara paralel yang kemudian dipasang pada tegangan 24 Volt. Hitunglah :
   a. kapasitas kapasitor susunan paralel tersebut,
   b. muatan total yang tersimpan pada kapasitor,
   c. tegangan pada masing-masing kapasitor, dan
   d. muatan pada masing-masing kapasitor!

2. Tiga buah kapasitor masing-masing kapasitasnya 8 μF, 12 μF, dan 24 μF disusun paralel kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar 24 Volt.
   Hitunglah :
   a. kapasitas kapasitor susunan paralel tersebut,
   b. muatan total yang tersimpan pada kapasitor,
   c. tegangan pada masing-masing kapasitor, dan
   d. muatan pada masing-masing kapasitor!

c. Susunan Seri-Paralel



Gambar 3.11 *Susunan seri-paralel kapasitor*

Gambar di samping ini menggambarkan susunan seri-paralel kapasitor yang juga disebut susunan majemuk atau susunan gabungan seri dan paralel kapasitor. Untuk menyelesaikan susunan seri-paralel dapat ditempuh dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1) Apabila dalam rangkaian/susunan seri terdapat susunan paralel, kerjakan dulu susunan paralelnya.
2) Apabila dalam susunan paralel terdapat susunan seri, kerjakan dulu susunan serinya.

Contoh Soal

Berapakah besarnya kapasitas kapasitor susunan majemuk pada Gambar 3.11?

Kapasitor C_2 dan C_3 tersusun paralel, besarnya kapasitas penggantinya adalah :

$C_p = C_2 + C_3 \quad = 2 + 4 = 6\ \mu F$

Kapasitor C_1 dan C_p tersusun seri maka besarnya kapasitas penggantinya adalah :

$$\frac{1}{C_{AB}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6} \text{ jadi } C_{AB} = \frac{6}{3} = 2\ \mu F$$

Ringkasan

1. Besarnya gaya Coulomb antara dua buah benda dinyatakan $F = k\frac{q_1 . q_2}{r^2}$, antara dua benda yang muatannya sejenis akan terjadi gaya tolak-menolak sedangkan jika muatan berlawanan akan terjadi gaya tarik-menarik.
2. Kuat medan listrik yaitu ruangan di sekitar benda bermuatan listrik yang mampu memberikan gaya listrik pada benda yang diletakkan dalam ruangan tersebut.
3. Energi potensial listrik yaitu usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik dari jauh tak terhingga ke titik itu. Besarnya energi potensial listrik di suatu titik dalam medan dinyatakan :

   $E_P = k\frac{q_1 . q_2}{r^2}$.
4. Potensial listrik didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan yaitu : $E = \frac{E_P}{q} = k\frac{q}{r}$
5. Kapasitas sebuah kapasitor dinyatakan $C = \frac{\varepsilon A}{d}$, yang berarti kapasitas sebuah kapasitor berbanding lurus dengan luas penampang keping dan berbanding terbalik dengan jarak antara kedua keping dan tergantung pada bahan dielektrikum yang diselipkan di antara kedua keping kapasitor.
6. Besarnya energi yang tersimpan dalam kapasitor dinyatakan :

   $W = \frac{1}{2}CV^2$, energi yang tersimpan dalam kapasitor berupa energi medan listrik.
7. Kapasitor pengganti susunan seri dapat dinyatakan :

   $$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$
8. Kapasitas pengganti susunan paralel dapat dinyatakan :

   $C_p = C_1 + C_2 + C_3$

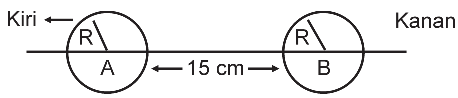
Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Dua partikel masing-masing bermuatan q_1 dan q_2 yang tidak diketahui besar dan jenisnya terpisah sejauh d. Antara kedua muatan itu dan pada garis hubungnya terdapat titik P dan jaraknya $\frac{3}{4}$ d dari q_1. Jika kuat medan di titik P sama dengan nol, maka ....
   A. q_1 dan q_2 adalah muatan-muatan yang tidak sejenis
   B. potensial di titik P yang disebabkan oleh q_1 dan q_2 sama
   C. potensial di titik P sama dengan nol
   D. besar muatan q_1 = 2 kali besar muatan q_2
   E. besar muatan q_1 = 4 kali besar muatan q_2

2. Bola konduktor A dan B dengan jari-jari sama 5 cm, bermuatan listrik q_A = 9 μC dan q_B = -4 μC. Letak suatu titik yang kuat medannya sama dengan nol adalah ....



   A. 45 cm dari pusat bola B arah kanan
   B. 45 cm dari kulit bola B arah kanan
   C. 45 cm dari pusat bola A arah kiri
   D. 20 cm dari pusat bola A arah kiri
   E. 10 cm dari pusat bola B arah kanan

3. Dua muatan listrik yang berada dalam media dengan permitivitas relatif = 5, menghasilkan gaya Coulomb menjadi sebesar 15 N. Jika bahan media tersebut dihilangkan, besarnya gaya Coulomb menjadi ....
   A. 3 N
   B. 10 N
   C. 15 N
   D. 20 N
   E. 75 N

4. Kuat medan listrik di suatu titik sejauh R dari muatan *Q* diperbesar menjadi 100 kali semula. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memperbesar ....
   A. muatan menjadi 5 kali dan jaraknya $\frac{1}{4}$ kali
   B. muatan menjadi 4 kali dan jaraknya $\frac{1}{5}$ kali
   C. muatan menjadi 5 kali dan jaraknya 4 kali
   D. muatan menjadi 4 kali dan jaraknya 5 kali
   E. muatan menjadi 5 kali dan jaraknya $\frac{1}{5}$ kali

5. Kapasitas kapasitor suatu keping sejajar yang bermuatan adalah ....
   A. berbanding lurus dengan besar muatannya
   B. berbanding terbalik dengan beda potensial antara kedua keping
   C. makin besar apabila jarak antara dua keping diperbesar
   D. makin besar apabila luas kedua keping diperbesar
   E. tidak tergantung pada medium antara kedua keping

6. Sebuah kapasitor bila berada di udara besarnya 2 μF dan 8 μF bila di antara dua kepingnya ditempatkan lembaran porselin, maka konstanta dielektrik porselin adalah ....
   A. 4
   B. 6
   C. 10
   D. 16
   E. 64

7. Dua keping sejajar terpisah sejauh 5 cm, diberi muatan berlawanan (yang atas positif) sehingga potensialnya 10 KV. Bila muatan elektron $1{,}6 \times 10^{-19}$ Coulomb, maka besar dan arah gaya Coulomb pada sebuah elektron yang ada di antara kedua keping adalah ....
   A. $12{,}5 \times 10^{-24}$, ke atas
   B. $0{,}8 \times 10^{-17}$ N, ke atas
   C. $0{,}8 \times 10^{-17}$ N, ke bawah
   D $3{,}2 \times 10^{-13}$ N, ke atas
   E. $3{,}2 \times 10^{-13}$ N, ke bawah

8. Sebuah kapasitor keping sejajar memiliki jarak keping d, luas penampang A, dan tetapan dielektrik ε_0. Bila kapasitor tersebut bermuatan listrik positif, dan di bawah ini penyataan mengenai kapasitor yaitu :
   1. jarak diduakalikan, maka potensial menjadi 2 kali semula
   2. luas penampang diduakalikan, maka potensial menjadi 2 kali semula
   3. konstanta dialiktrik diduakalikan, maka potensial menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula

   Pernyataan yang benar adalah nomor ....
   A. 1 dan 3
   B. 2 dan 3
   C. 1 dan 2
   D. 1, 2 dan 3
   E. 3 saja

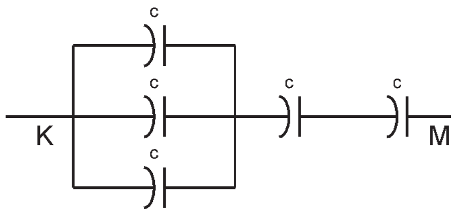
9. Sebuah kapasitor bermuatan 10 μC dan mempunyai beda potensial 100 Volt. Energi yang tersimpan di dalamnya adalah ....
   A. 1 .10^{-8} Joule
   B. 5 .10^{-7} Joule
   C. 5 .10^{-6} Joule
   D. 1 .10^{-6} Joule
   E. 5 .10^{-5} Joule

10. Sebuah kapasitor C_1 = 2 μF, diisi sehingga tegangannya 20 Volt. Kapasitor dilepas lalu dihubungkan dengan kapasitor C_2 = 8 μF secara paralel. Tegangan kedua kapasitor menjadi ....
   A. 2 Volt
   B. 4 Volt
   C. 6 Volt
   D. 8 Volt
   E . 16 Volt

11. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 2 μF, 3 μF, dan 5 μF disusun secara paralel dan dihubungkan dengan sumber tegangan 200 volt, maka besar muatan ketiganya adalah ....
   A. 2.500 μC
   B. 4.000 μC
   C. 500 μC
   D. 1.000 μC
   E. 2.000 μC

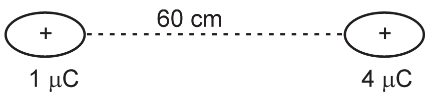
12. Potensial dari suatu titik yang berjarak tertentu dari muatan q adalah 1.000 volt, kuat medan listrik di titik tersebut 100 V/m, maka besar muatan tersebut ....
   A. 1,1 × 10^{-6} C
   B. 2,3 × 10^{-6} C
   C. 6,2 × 10^{-6} C
   D. 2,2 × 10^{-5} C
   E. 3,2 × 10^{-5} C

13. 5 buah kapasitor yang identik disusun seperti pada gambar di bawah ini. Besarnya kapasitas antara titik K dan M (kapasitas kapasitor pengganti susunan tersebut) adalah ....



A. $\frac{8}{3}$ C
B. $\frac{1}{5}$ C
C. 5 C
D. $\frac{7}{3}$ C
E. $\frac{3}{7}$ C

14. Dua buah muatan besarnya masing-masing 1 μC dan 4 μC terpisah pada jarak 60 cm. Letak suatu titik yang kuat medan listriknya sama dengan nol terhadap muatan 1 μC ....



A. 20 cm di kiri
B. 20 cm di kanan
C. 40 di kiri
D. 40 cm di kanan
E. 30 cm di kiri

15. Percepatan yang dialami sebuah elektron bergerak dalam medan listrik E, jika diketahui massa elektron m dan muatan elektron *e*, adalah ....

A. $\frac{em}{E}$
B. $\frac{eE}{m}$
C. $\frac{e}{mE}$
D. $\frac{E}{em}$
E. $e\ m\ E$

B. Kerjakan soal di bawah ini!

1. Dua buah benda bermuatan listrik berada pada jarak 4 cm satu dengan lainnya. Kedua benda itu kemudian saling dijauhkan hingga gaya tolak-menolaknya menjadi seperempat kalinya. Tentukan berapa jarak antara kedua benda itu sekarang!
2. Potensial dari suatu titik yang berjarak tertentu dari muatan Q adalah 1000 Volt. Kuat medan listrik di titik tersebut 100 V/m. Tentukan berapa besar muatan listrik tersebut!
3. Untuk memindahkan muatan 10 Coulomb dari titik A yang potensialnya 100 V ke titik B yang potensialnya 600 V, tentukan berapa joule usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan listrik tersebut!
4. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 3 F, 6 F, dan 9 F dihubungkan secara seri. Kedua ujung dari gabungan tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan yang besarnya 220 Volt. Tentukan besarnya tegangan antara ujung-ujung kapasitor yang 3 Farad!
5. Sebuah kapasitor diberi muatan 10 μC akan mempunyai beda potensial 100 Volt antara pelat-pelatnya. Hitunglah besar kapasitas kapasitor dan berapa joule energi yang yang tersimpan dalam kapasitor tersebut!

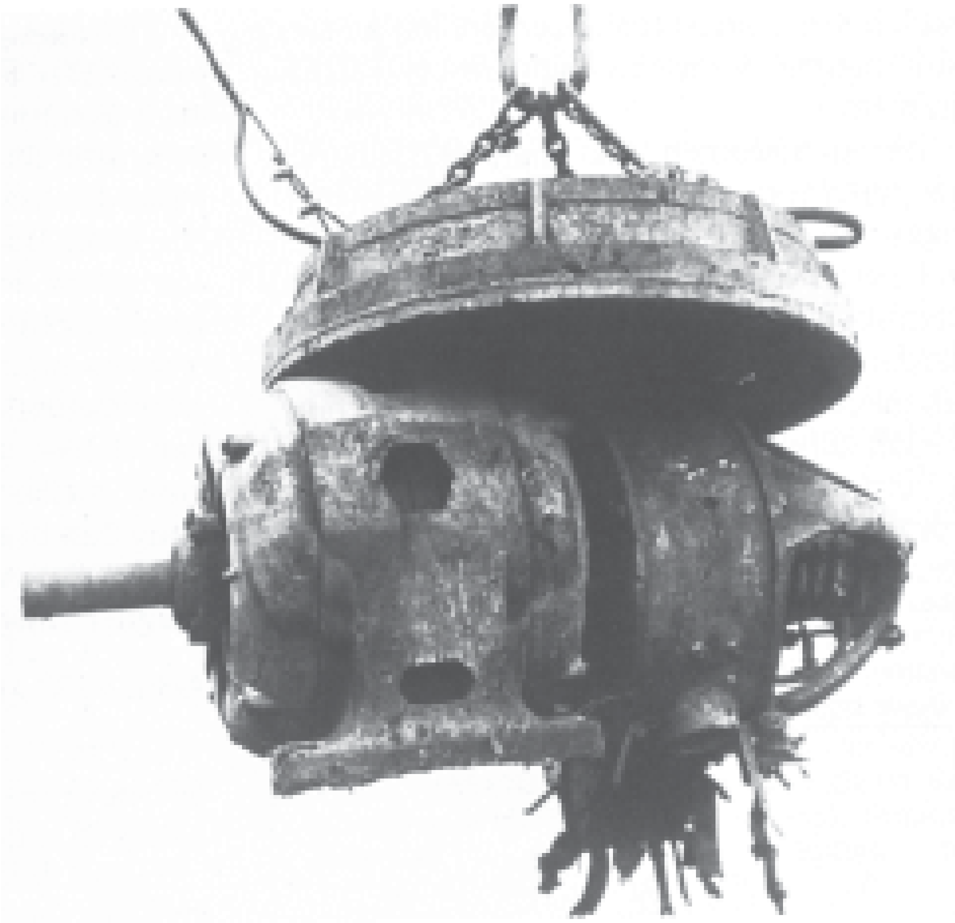
Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, kalian seharusnya memahami tentang :

1. gaya listrik, kuat medan listrik, potensial listrik, energi potensial listrik,
2. penerapan prinsip-prinsip elektrostatis pada keping sejajar.

Apabila ada hal-hal yang belum kalian pahami, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

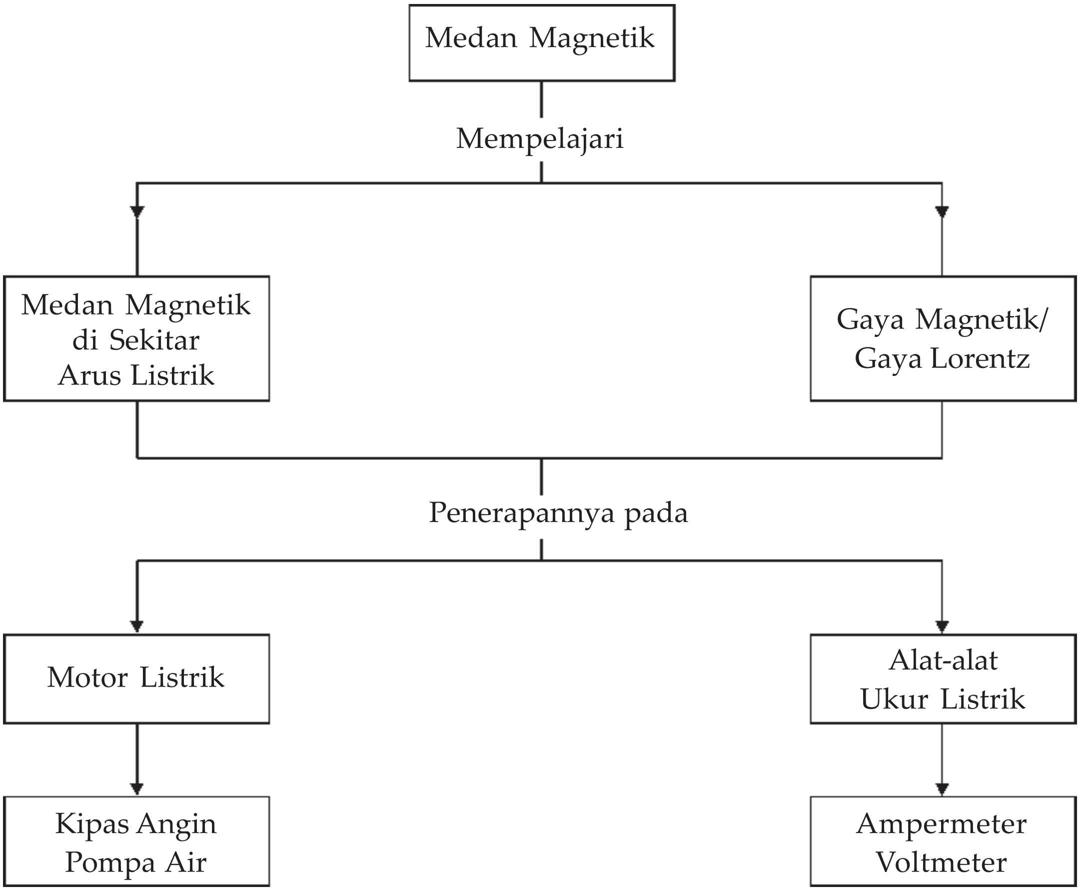
Bab IV
Medan Magnetik



Sumber : Ilmu Pengetahuan Populer Jilid 5

Magnet industri yang sangat kuat dapat mengangkat bahan-bahan yang sangat berat, termasuk sekitar tiga metrik ton motor rongsokan. Hal ini merupakan salah satu contoh pemanfaatan magnet dalam bidang industri.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. memformulasikan medan magnet dan gaya magnet, dan
2. menerapkan induksi magnetik dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi.

Motivasi Belajar

Medan magnetik ialah ruang di sekeliling suatu magnet yang dipengaruhi / mengalami gaya magnetik. Marilah kita sekarang meninjau lebih lanjut medan magnetik di sekitar suatu arus listrik yang mengalir melalui sebuah kawat penghantar. Apa dan bagaimana pengaruh arus listrik yang melalui sebuah kawat penghantar terhadap medan magnet? Pada bab ini kita akan membatasi pembahasan terhadap penghantar lurus, penghantar berbentuk lingkaran, dan penghantar berbentuk kumparan atau solenoid.

Kata-kata Kunci

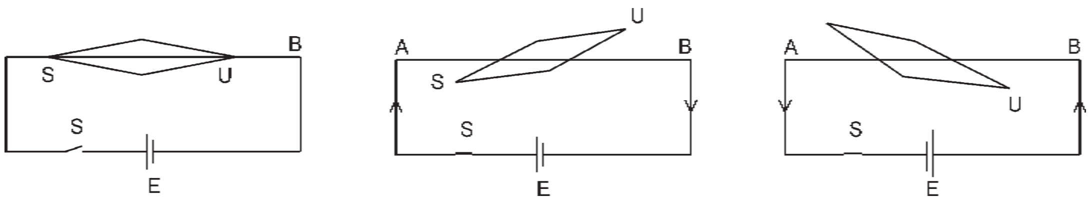
medan magnetik, hukum Biot-Savart, induksi magnetik, solenoid, toroida, gaya lorentz

Sebagaimana yang telah kalian pelajari di kelas XI, bahwa terdapat hubungan yang erat sekali antara kelistrikan dan kemagnetan. Pada bab ini akan kita bahas lebih dalam lagi hubungan antarkeduanya. Bayangkan di suatu ruang ada sebuah penghantar. Apabila melalui penghantar itu dialirkan arus listrik, ruang di sekitar penghantar itu mengalami perubahan. Adanya perubahan itu hanya dapat diketahui secara tidak langsung, di antaranya dari menyimpangnya arah sebuah magnet jarum yang ada di ruangan itu, seperti pada percobaan Oersted. Ilmuwan mengatakan bahwa ruang itu berubah menjadi *medan magnetik*. Arus listrik menimbulkan medan magnetik di sekitarnya.

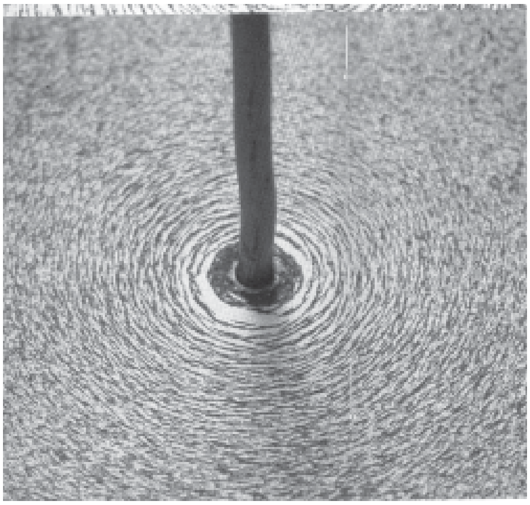
A. Medan Magnet di Sekitar Kawat Berarus

Hans Christian Oersted (1777 - 1851) fisikawan berkebangsaan Denmark. Setelah melakukan eksperimen cukup lama, pada tahun 1819 Oersted berhasil menemukan bahwa, *"Jika sebuah magnet jarum (kompas kecil) didekatkan pada suatu penghantar yang berarus listrik, magnet jarum akan menyimpang"*. Hal ini menunjukkan bahwa di sekitar kawat berarus terdapat medan magnet. Untuk mengetahui hubungan antara arus, kuat arus, dan medan magnet yang timbul, dapat dilakukan percobaan berikut ini.

Ambillah sebuah kawat penghantar yang panjangnya kira-kira 50 cm, kemudian kita bentangkan di atas magnet jarum kompas. Kita atur sedemikian rupa arah bentangan kawat penghantar sejajar dengan arah magnet jarum pada kompas seperti terlihat pada **Gambar (4.1)**.



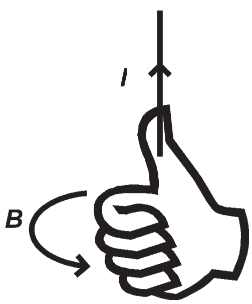
Gambar 4.1 *Arus listrik menimbulkan medan magnetik.*



Sumber : Jendela Iptek : Listrik

Gambar 4.2 *Serbuk besi memperlihatkan garis-garis gaya magnetik di sekitar penghantar yang dialiri arus. Dapat dilihat hubungan antara gaya listrik dan kemagnetan.*

Pada saat ujung kawat AB tidak dihubungkan dengan sumber tegangan (baterai), kedudukan magnet jarum sejajar dengan bentangan kawat. Pada saat ujung A dihubungkan dengan kutub positif baterai dan ujung B dengan kutub negatif baterai, ternyata kutub utara magnet menyimpang ke kiri. Sebaliknya jika ujung A dihubungkan dengan kutub negatif baterai dan ujung B dengan kutub positif baterai, maka kutub utara magnet menyimpang ke kanan. Penyimpangan kutub magnet utara tersebut menunjukkan adanya medan magnet di sekitar kawat beraliran arus listrik. Penyimpangan kutub utara magnet ini memberi petunjuk tentang arah medan magnet di sekitar kawat berarus. Arah medan magnet di sekitar kawat berarus ditunjukkan dengan aturan tangan kanan, yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.3 *Aturan tangan kanan untuk mencari arah medan magnet.*

Hukum

Apabila arah ibu jari menyatakan arah aliran arus listrik, maka arah lipatan jari-jari yang lainnya menyatakan arah medan magnet.

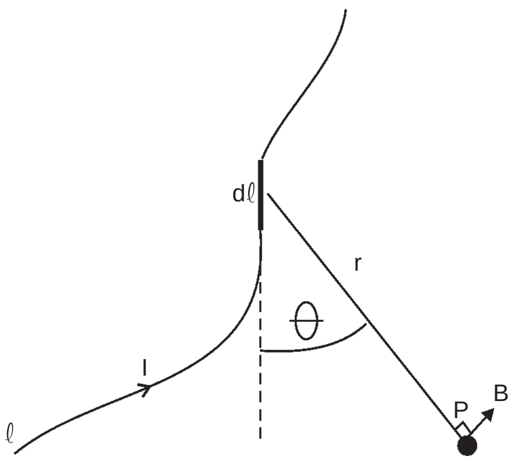
Gambar (4.3) menggambarkan arah medan magnet di sekitar kawat berarus listrik. Medan magnet termasuk besaran vektor.

1. Hukum Biot-Savart

Pada saat **Hans Christian Oersted** mengadakan percobaan untuk mengamati hubungan antara kelistrikan dan kemagnetan, ia belum sampai menghitung besarnya kuat medan magnet di suatu titik di sekitar kawat berarus. Perhitungan secara matematik baru dikemukakan oleh

ilmuwan dari Prancis yaitu **Jean Bastiste Biot** dan **Felix Savart**. Berdasarkan hasil eksperimennya tentang pengamatan medan magnet di suatu titik P yang dipengaruhi oleh suatu kawat penghantar $d\ell$, yang dialiri arus listrik I diperoleh kesimpulan bahwa besarnya kuat medan magnet (yang kemudian disebut induksi magnet yang diberi lambang B) di titik P :

a. Berbanding lurus dengan kuat arus listrik *(I)*.
b. Berbanding lurus dengan panjang kawat ($d\ell$).
c. Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara titik P ke elemen kawat penghantar *(r)*.
d. Sebanding dengan sinus sudut apit θ antara arah arus dengan garis hubung antara titik P ke elemen kawat penghantar.



Gambar 4.4 *Induksi magnetik dB akibat elemen penghantar dℓ berarus listrik I.*

Pernyataan tersebut dikenal dengan hukum Biot-Savart yang secara matematik dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$dB = k\frac{Id\ell\ \sin\theta}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} = \frac{Id\ell\ \sin\theta}{r^2} \quad \text{.... (4.1)}$$

dengan :

dB = Induksi magnet di titik P (Wb/m^2 atau Tesla)

I = kuat arus listrik (A)

$d\ell$ = panjang elemen kawat berarus (m)

θ = sudut antara arah I dengan garis hubung P ke $d\ell$

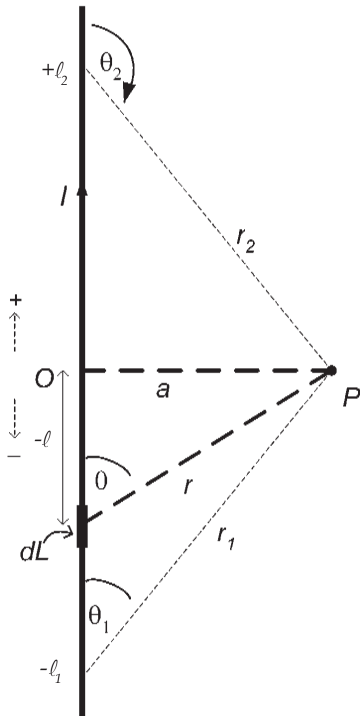
$k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ = bilangan konstanta = 10^{-7} Wb $A^{-1}m^{-1}$

r = jarak dari P ke $d\ell$ (m)

2. Induksi Magnetik di Sekitar Kawat Lurus Panjang Berarus Listrik

Untuk menghitung besarnya induksi magnetik di suatu titik yang terletak di sekitar kawat penghantar lurus dan panjang yang beraliran arus sebesar I dapat diturunkan dari hukum Biot-Savart.

Misalnya suatu titik P terletak pada jarak a dari kawat penghantar **(Lihat Gambar 4.5)**, besarnya induksi magnet di titik P yang diakibatkan oleh elemen sepanjang *dL* yang berjarak *r* dari titik dapat dinyatakan:



***Gambar 4.5** Penerapan hukum Biot-Savart pada penghantar lurus panjang berarus*

$$dB_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \sin\theta}{r^2} \qquad .... (4.2)$$

Dari Gambar 4.5 tampak bahwa :

$$\sin\theta = \frac{a}{r} \text{ atau } r = \frac{a}{\sin\theta}$$

$$\text{ctg } \theta = \frac{-\ell}{a} \text{ atau } \ell = -a \text{ ctg } \theta$$

$$d\ell = a \text{ cosec}^2\ \theta\ d\theta$$

Apabila harga-harga tersebut kita substitusikan ke persamaan (4.2) akan menjadi

$$dB_p = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I\left(a\, cosec^2\ \theta d\theta\right) sin\ \theta}{a^2\ cos\, ec^2\theta}$$

$$dB_p = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin\theta d\theta}{a}$$

Besarnya nilai B_P dapat ditentukan dengan mengintegralkan dengan batasan nilai θ mulai dari θ_1 sampai dengan menjadi θ_2.

$$B_P = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dB_p = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta d\theta$$

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(-\cos\theta\right)\Big|_{\theta_1}^{\theta_2} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(\cos\theta_2 - \cos\theta_1\right)$$

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(\cos\theta_1 - \cos\theta_2\right)$$

Untuk kawat yang sangat panjang maka $\theta_1 = 0^o$ dan $\theta_2 = 180^o$ sehingga :

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(1 - (-1)\right) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left(1 + 1\right) = \frac{2\mu_0 I}{4\pi a}$$

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad \text{.... (4.3)}$$

B_P = induksi magnetik di titik P (Wb/m^2 atau Tesla)
μ_0 = permeabilitas ruang hampa (4×10^{-7} Wb $A^{-1}m^{-1}$)
I = kuat arus yang mengalir dalam kawat (A)
a = jarak titik P ke kawat penghantar (m)

Arah medan magnet di titik P dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan **(Lihat Gambar 4.3)**, jika titik P di sebelah kanan kawat dan arus listrik pada kawat penghantar dari bawah ke atas, maka arah medan magnet di titik P masuk bidang gambar. Jika untuk P di sebelah kiri, arah medan magnetnya keluar bidang gambar. Ke manakah arah medan magnet jika titik P berada di depan atau di belakang kawat penghantar tersebut?

Contoh Soal

Sebuah kawat lurus panjang yang dialiri arus listik sebesar 10 A dari arah timur ke barat, tentukan besar dan arah induksi magnetik di titik P tepat di bawah kawat tersebut pada jarak 10 cm!

Penyelesaian :

Diketahui : I = 10 A
A = 10 cm = 0,1 m
μ_0 = 4×10^{-7} $WbA^{-1}m^{-1}$

Ditanyakan : B_P = ...?

Jawab : $B_P = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$

$= \frac{4\pi.10^{-7}.10}{2\pi.0,1}$ T

= 2.10^{-5} T yang arahnya ke selatan.

Jadi, besarnya induksi magnet di titik P adalah :
2.10^{-5} T yang arahnya ke selatan.

Soal Latihan :

1. Dua buah kawat lurus panjang dan sejajar terpisah pada jarak 10 cm, yang masing-masing dialiri arus listrik sebesar 6 A dan 8 A. Tentukan besar dan arah induksi magnetik di titik P yang berjarak 4 cm dari kawat pertama dan 6 cm dari kawat kedua!
2. Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus listrik Jika besarnya induksi magnetik pada suatu titik yang berjarak 4 cm dari kawat sebesar 4 .10^{-5} T, tentukan berapa ampere kuat arus yang mengalir melalui kawat tersebut!

3. Induksi Magnetik pada Sumbu Lingkaran Kawat Berarus Listrik

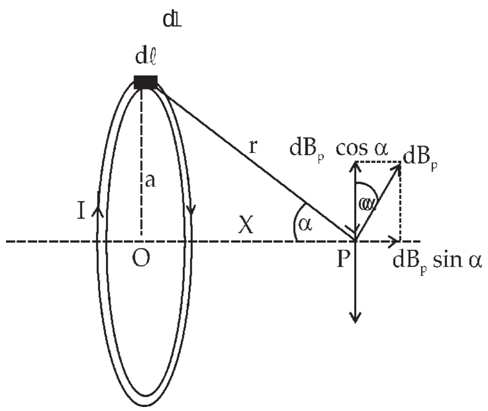
Besarnya induksi magnetik pada suatu titik yang terletak pada garis sumbu penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari α dapat dicari sebagai berikut :

Perhatikan **Gambar (4.6)** besarnya induksi magnet di titik P yang terletak pada garis sumbu lingkaran akibat elemen kawat sepanjang $d\ell$ yang berjarak r dapat dinyatakan :

$$dB_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \ \sin\theta}{r^2} \qquad \text{.... (4.4)}$$

Karena arah I tegak lurus terhadap $d\ell$, maka θ = 90° dan sin 90° = 1, maka :

$$dB_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell}{r^2} \qquad \text{.... (4.5)}$$



Gambar 4.6 *Induksi magnetik pada sumbu lingkaran kawat berarus*

Induksi magnetik arahnya tegak lurus terhadap r, apabila α adalah sudut apit antara r dengan sumbu lingkaran. Maka medan magnetik di titik P dapat diuraikan menjadi dua, yaitu yang sejajar dengan sumbu lingkaran sebesar dB_P sin α dan tegak lurus sumbu lingkaran yaitu sebesar dB_P cos α. Di mana bagian dB_P cos α akan saling meniadakan dengan bagian yang ditimbulkan oleh elemen yang lain yang saling berseberangan, sehingga besarnya

induksi magnetik di titik P tinggal bagian yang sejajar dengan sumbu lingkaran yaitu :

$$dB_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \ \sin\theta}{r^2} \qquad \text{.... (4.6)}$$

Kawat penghantar mempunyai bentuk lingkaran, maka panjang kawat dapat dinyatakan sebagai keliling lingkaran, sehingga besarnya induksi magnetik di titik P adalah :

$$B_P = \int_0^{2\pi a} \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \ \sin\alpha}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha}{r^2} \int_0^{2\pi a} d\ell$$

$$B_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin\alpha}{r^2} \ell \Big|_0^{2\pi a} = \frac{I 2\pi a \sin\alpha}{4\pi r^2}$$

$$B_P = \frac{\mu_0 Ia \ \sin\alpha}{2r^2} \qquad \text{.... (4.7)}$$

Dari **Gambar (4.6)** tampak bahwa $\sin\alpha = \frac{a}{r}$ atau $\sin^2 \alpha = \frac{a^2}{r^2}$

maka nilai $r^2 = \frac{a^2}{\sin^2 \alpha}$, jika nilai r^2 disubstitusikan ke persamaan (4.7) didapatkan persamaan yang lebih sederhana yaitu :

$$B_p = \frac{\mu_0 \ I \sin^3 \alpha}{2a} \qquad \text{.... (4.8)}$$

Apabila titik P berada di titik pusat lingkaran, maka $\alpha = 90^o$ dan $r = a$. Dengan demikian induksi magnetik di titik pusat lingkaran adalah :

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{2a} \qquad \text{.... (4.9)}$$

Apabila kawat penghantar terdiri atas N buah lilitan kawat, maka induksi magnetik di pusat lingkaran adalah :

$$B_P = \frac{\mu_0 IN}{2a} \qquad \text{.... (4.10)}$$

Contoh Soal

Sebuah kawat penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari 8 cm dan terdiri atas 20 lilitan yang dialiri arus listrik sebesar 10 A. Tentukan besar induksi magnet di titik pusat lingkaran dan di titik yang terletak pada garis sumbu dan berjarak 6 cm dari pusat lingkaran!

Penyelesaian :

Diketahui : a = 8 cm = 8.10^{-2} m

x = 6 cm = 6.10^{-2} m

I = 10 A

N = 20 lilitan

Ditanyakan : a. B_P = ...? di titik pusat lingkaran

b. B_P = ...? di titik pada jarak 6 cm dari pusat lingkaran

Jawab :

a. $$B_P = \frac{\mu_0 IN}{2a}$$

$$r = \sqrt{x^2 + a^2}$$

$$= \sqrt{8^2 + 6^2}$$

$$= \sqrt{64 + 35} = \sqrt{100} = 10 \text{ cm}$$

$$B_P = \frac{4\pi.10^{-7} \times 10 \times 20}{2 \times 8.10^{-2}}$$

$$= 5\pi \times 10^{-3} \text{ T}$$

Jadi, besarnya induksi magnet di titik pusat lingkaran adalah $5\pi \times 10^{-3}$ T.

b. $$B_P = \frac{\mu_0 IN \sin^3 \alpha}{2 \times 8.10^{-2}}$$

$$= \frac{4\pi.10^{-7} \times 10 \times 20(0,8)^3}{2 \times 8.10^{-2}}$$

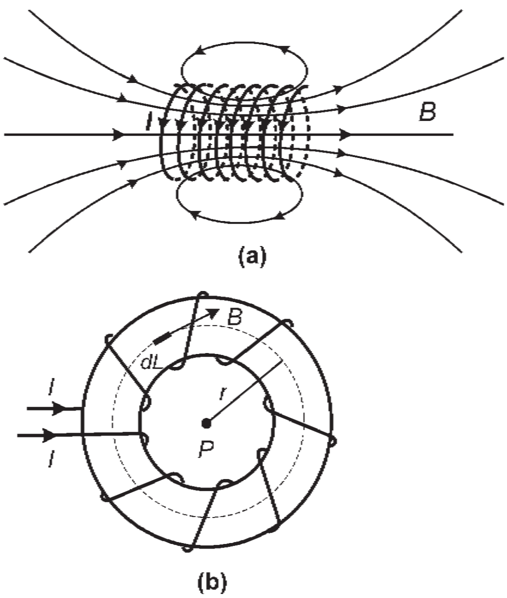
$$= 2,54\pi \times 10^{-6} \text{ T.}$$

Jadi, besarnya induksi magnet di titik pada jarak 6 cm dari pusat lingkaran adalah $2,54\pi \times 10^{-6}$ T.

Soal Latihan :

1. Suatu kawat penghantar berbentuk lingkaran dialiri arus listrik, jika induksi magnet di titik pusat lingkaran sebesar 6 .10^{-5} T, tentukan berapa kuat arus yang mengalir pada kawat tersebut!
2. Kawat penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari 15 cm dialiri arus listrik 10 A. Tentukan besarnya induksi magnet :
   a. di titik pusat lingkaran, dan
   b. di titik yang berjarak 20 cm dari pusat lingkaran pada sumbu kawat!

4. Induksi Magnetik di Sumbu Solenoida dan Toroida



Gambar 4.7 (a) Solenoida (b) Toroida

Solenoida adalah kumparan yang panjang di mana diameter kumparan lebih kecil dibandingkan dengan panjang kumparan, jarak antara lilitan yang satu dengan yang lainnya sangat rapat dan biasanya terdiri atas satu lapisan atau lebih. Sedangkan *toroida* adalah sebuah solenoida yang dilengkungkan sehingga membentuk lingkaran seperti terlihat pada **Gambar (4.7).**

Besarnya induksi magnetik pada titik yang terletak pada sumbu solenoida dinyatakan dengan persamaan :

Jika titik P di pusat solenoida

$$B = \mu_0 In \text{ atau } B = \frac{\mu_0 IN}{L} \quad \text{.... (4.11)}$$

Jika titik P terletak di ujung solenoida

$$B = \frac{\mu_0 In}{2} \text{ atau } \frac{\mu_0 IN}{2L} \quad \text{.... (4.12)}$$

dengan :

B = induksi magnet di pusat (tengah-tengah) solenoida
μ_0 = permeabilitas ruang hampa
I = kuat arus listrik dalam solenoida
N = jumlah lilitan dalam solenoida
L = panjang solenoida

Besarnya induksi magnetik di pusat sumbu toroida adalah

$$B = \mu_0 \, In \text{ atau } B = \frac{\mu_0 \, IN}{2\pi \, r} \qquad \text{.... (4.13)}$$

dengan :

B = induksi magnet di pusat (tengah-tengah) toroida

μ_0 = permeabilitas ruang hampa

I = kuat arus listrik dalam toroida

N = jumlah lilitan dalam toroida

$2\pi r$ = keliling toroida

Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Bagaimana menentukan kutub-kutub magnet pada solenoida?

Contoh Soal

1. Sebuah solenoida yang panjangnya 50 cm memiliki 2000 lilitan, dialiri arus sebesar 4 ampere. Hitunglah induksi magnet :
   a. di ujung solenoida,
   b. di tengah-tengah solenoida!

   Penyelesaian :

   Diketahui : L = 50 cm = 5.10^{-1} m

   N = 2.000 llt

   I = 4 A

   μ_0 = $4\pi \times 10^{-7}$ Wb $A^{-1}m^{-1}$

   Ditanyakan : a. B = ...? di ujung

   b. B = ...? di tengah-tengah

   Jawab :

   $$n = \frac{N}{L} = \frac{2.10^3}{5.10^{-1}} = 4.10^3 \text{ lilitan/m}$$

   a. Induksi magnet di ujung solenoida

   $$B = \frac{1}{2} \mu_0 \, In$$
   $$= \frac{1}{2} \, . \, 4\pi.10^{-7} \, . \, 4 \, . \, 4.10^3$$
   $$= 32\pi \, . \, 10^{-4} \text{ T}$$

b. Induksi magnet di tengah-tengah solenoida

$B = \mu_0 In$

$= 4\pi.10^{-7} . 4 . 4.10^3$

$= 64\pi . 10^{-4}$ T

2. Sebuah toroida yang memiliki 4.000 lilitan dialiri arus sebesar 5 A. Apabila diketahui jari-jari lingkaran bagian dalam 8 cm dan bagian luar 12 cm. Tentukan besarnya induksi mgnet pada toroida tersebut!

Diketahui : N = 4.000 llt

I = 5 A

r_1 = 8 cm

r_2 = 12 cm

Ditanyakan : B = ...?

Jawab : Jari-jari rata-rata toroida adalah :

$$r = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) = \frac{1}{2}(8 + 12) = 10 \text{ cm} = 1.10^{-1} \text{ m}$$

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi r}$$

$$= \frac{4\pi.10^{-7}.5.4.10^3}{2\pi.1.10^{-1}} = 4.10^{-2} \text{ T}$$

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

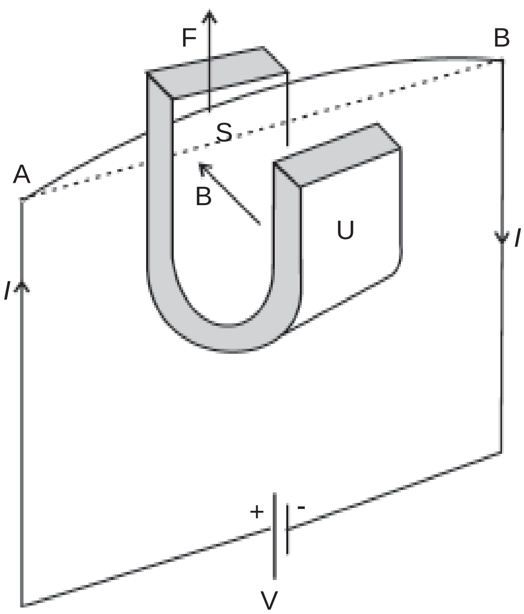
Adanya medan magnet di sekitar kawat yang beraliran arus listrik dapat dimanfaatkan untuk melakukan kegiatan misalnya menjalankan mesin produksi pada suatu pabrik dengan memanfaatkan sebuah relai yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Coba buatlah sebuah relai sederhana yang diperlengkapi dengan skema alat, cara kerja, dan rincian biaya yang digunakan sampai alat tersebut dapat digunakan!

Soal Latihan :

1. Sebuah solenoida panjangnya 25 cm, terdiri atas 500 lilitan. Apabila solenoida tersebut dialiri arus listrik sebesar 5 A, tentukan besarnya induksi magnet di ujung dan di tengah-tengah solenoida tersebut!
2. Sebuah toroida memiliki 10.000 lilitan. Apabila jari-jari lingkaran luar dan dalam toroida masing-masing 18 cm dan 12 cm, tentukan besarnya induksi magnet di dalam toroida tersebut!

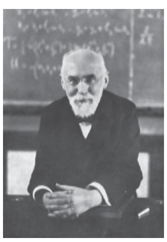
B. Gaya Magnetik (Gaya Lorentz)

Alat listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik adalah motor listrik. Motor listrik jika kita hubungkan dengan sumber tegangan akan berputar. Bagaimana prinsip motor listrik tersebut bekerja, dapatkah kalian menjelaskannya? Apabila kita perhatikan di dalam motor listrik terdapat sebuah kumparan kawat dan magnet tetap. Motor listrik tersebut dapat berputar karena timbulnya gaya Lorentz atau gaya magnetik yang terjadi pada kumparan kawat penghantar beraliran arus listrik yang berada dalam medan magnet. Marilah sekarang kita mempelajari timbulnya gaya magnet yang dialami oleh sebuah kawat penghantar berarus listrik yang berada di dalam medan magnet!



Gambar 4.8 *Gaya Lorentz pada kawat berarus dalam medan magnetik.*

Info Sains



Apabila sebuah penghantar berarus listrik berada di dalam medan magnet, timbul gaya Lorentz yang dapat menggerakkan penghantar tersebut. Hal ini pertama kali dikemukakan oleh fisikawan Belanda yang bernama Prof. Dr. Lorentz.

1. Gaya Magnetik pada Kawat Berarus dalam Medan Magnetik

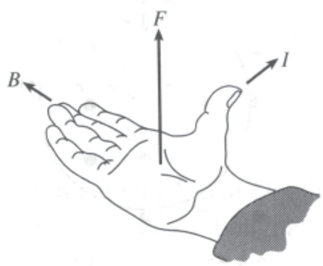
Perhatikan **Gambar (4.8)**, sebuah kawat penghantar AB yang dibentangkan melalui medan magnet yang ditimbulkan oleh magnet tetap. Apabila pada ujung kawat A kita hubungkan dengan kutub positif baterai dan ujung B kita hubungkan dengan kutub negatif baterai, maka pada kawat AB mengalir arus dari A ke B. Pada saat itu kawat AB akan bergerak ke atas. Sebaliknya jika arus listrik diputus (dihentikan), kawat kembali ke posisi semula. Sebaliknya jika ujung A dihubungkan dengan kutub negatif dan ujung B dihubungkan dengan kutub positif baterai, kembali kawat bergerak ke bawah (berlawanan dengan gerak semula). Gerakan kawat ini menunjukkan adanya suatu gaya yang bekerja pada kawat tersebut saat kawat tersebut dialiri arus listrik. Gaya yang bekerja pada tersebut disebut *gaya magnetik* atau *gaya Lorentz.*

Berdasarkan hasil percobaan yang lebih teliti menunjukkan bahwa besarnya gaya magnetik gaya Lorentz yang dialami oleh kawat yang beraliran arus lisrik :

a. Berbanding lurus dengan kuat medan magnet/induksi magnet (B).
b. Berbanding lurus dengan kuat arus listrik yang mengalir dalam kawat (I).
c. Berbanding lurus dengan panjang kawat penghantar (ℓ).
d. Berbanding lurus dengan sudut (θ) yang dibentuk arah arus (I) dengan arah induksi magnet (B).

Besarnya gaya magnetik/gaya Lorentz dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$F = B\,I\,\ell\ \sin\theta \qquad \text{.... (4.14)}$$



Gambar 4.9 *Arah gaya Lorentz berdasarkan kaidah tangan kanan.*

Arah gerakan kawat menunjukkan arah gaya magnetik/gaya Lorentz. Untuk mengetahui arah gaya Lorentz dapat digunakan *kaidah tangan kanan* (**Gambar 4.9**) sebagai berikut.

Aturan/kaidah tangan kanan

Apabila tangan kanan dalam keadaan terbuka (jari-jari dan ibu jari diluruskan). Arah dari pergelangan tangan menuju jari-jari menyatakan arah induksi magnet dan arah ibu jari menyatakan arah arus listrik, maka arah gaya magnetiknya dinyatakan dengan arah telapak tangan menghadap.

Atau dapat juga ditentukan dengan aturan tangan kiri yaitu sebagai berikut.

Aturan/kaidah tangan kiri

Apabila antara ibu jari, jari telunjuk, dan jari tengah pada tangan kiri direntangkan saling membentuk sudut 90^o, maka di sini arah jari telunjuk menyatakan arah induksi magnet, arah jari tengah menunjukkan arah arus, dan arah ibu jari menyatakan arah gaya Lorentz.

Contoh Soal

Sebuah kawat penghantar panjangnya 0,6 m diletakkan di dalam medan magnet homogen 4.10^{-5} T dan membentuk sudut 30^o. Berapa N gaya magnet yang dialami kawat jika dialiri arus sebesar 5 A?

Penyelesaian :

Diketahui : λ = 0,6 m

$B = 4.10^{-5}$ T

$\theta = 30^o$

$I = 5$ A

Ditanyakan : $F = ...?$

Jawab : $F = BI\ \ell \sin \theta$

$= 4.10^{-5} . 5 . 0,6 . \sin 30^o$

$= 12.10^{-5} . \dfrac{1}{2}$

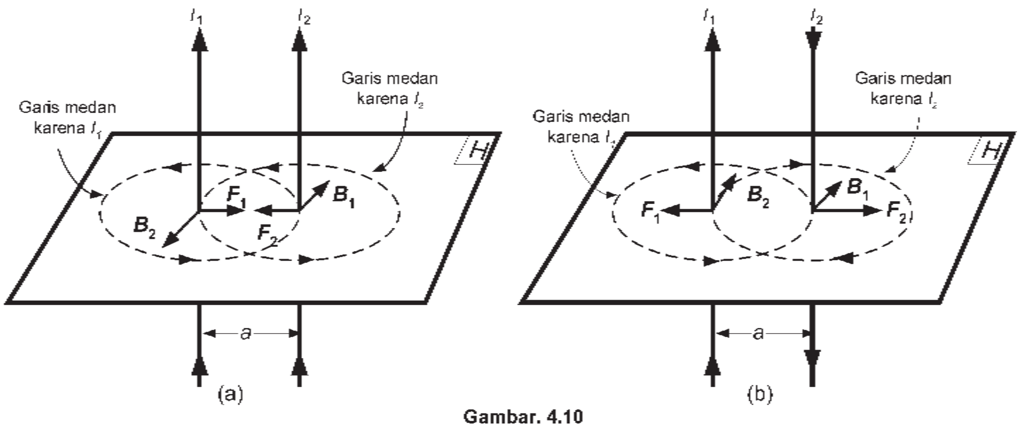
$= 6 . 10^{-5}$ N

Soal Latihan :

1. Sebuah kawat penghantar panjangnya 0,8 m dialiri arus sebesar 5 A. Apabila kawat tersebut berada dalam medan magnet homogen 5.10^{-4} Wb/m^2 dan arah medan magnet tegak lurus arah arus listrik, tentukan besar gaya magnetik yang dialami kawat tersebut!
2. Sebuah kawat penghantar lurus panjang dibentangkan dari timur ke barat, apabila medan magnet di tempat itu dari selatan ke utara, ke manakah arah gaya magnetik yang dialami kawat tersebut?

2. Gaya Magnetik di Antara Dua Kawat Sejajar Berarus

Gaya magnet juga dialami oleh dua buah kawat sejajar yang saling berdekatan yang beraliran arus listrik. Timbulnya gaya pada masing-masing kawat dapat dianggap bahwa kawat pertama berada dalam medan magnetik yang ditimbulkan oleh kawat kedua dan sebaliknya kawat kedua berada dalam medan magnetik yang ditimbulkan oleh kawat pertama.



Gambar 4.10 *Arah gaya magnetik di antara dua kawat sejajar berarus.*

Arah gaya magnetik yang terjadi pada kedua kawat dapat dilihat pada **Gambar (4.10)**. Apabila arah arus pada kawat itu searah maka pada kedua kawat akan terjadi gaya tarik-menarik dan sebaliknya jika arah arus pada kedua kawat berlawanan, maka akan tolak-menolak. Gaya tarik-menarik atau gaya tolak-menolak pada kedua kawat merupakan akibat adanya gaya magnet pada kedua kawat tersebut.

Besarnya gaya magnet pada masing-masing kawat dapat dinyatakan

$$F = B_1 I_2 \ \ell \ \sin\theta \ \text{ atau } F = B_2 I_1 \ \ell \ \sin\theta \qquad ....(4.15)$$

Karena arah B dan I saling tegak lurus atau $\theta = 90^o$ maka

$$F = B_1 I_2 \ \ell \quad \text{atau} \quad F = B_2 I_1 \ \ell \qquad ....(4.16)$$

dengan :

F = gaya magnet pada kawat
I_1 = arus listrik pada kawat 1
I_2 = arus listrik pada kawat 2
B_1 = induksi magnet yang ditimbulkan oleh kawat 1
B_2 = induksi magnet yang ditimbulkan oleh kawat 2
ℓ = panjang kawat penghantar

Pada awal bab telah dihitung bahwa besarnya induksi magnet di sekitar kawat lurus berarus listrik adalah :

$B = \dfrac{\mu_0 I}{2\pi a}$ maka nilai $B_1 = \dfrac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$ dan $B_2 = \dfrac{\mu_0 I_2}{2\pi a}$

jika harga ini dimasukkan dalam nilai F, menjadi $F = \frac{\mu_0\, I_1\, I_2\, \ell}{2\pi a}$.

Gaya magnetik di antara kedua kawat sejajar sering dinyatakan sebagai gaya per satuan panjang yaitu :

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0\, I_1\, I_2}{2\pi a} \qquad \text{.... (4.17)}$$

dengan a adalah jarak antara kedua kawat tersebut.

Contoh Soal

Dua buah kawat panjang sejajar terpisah pada jarak 10 cm, masing-masing dialiri arus sebesar 10 A dan 20 A, tentukan besar gaya magnetik per satuan panjang yang bekerja pada kawat!

Penyelesaian :

Diketahui : a = 10 cm = 0,1 m

I_1 = 10 A

I_2 = 20 A

$\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ Wb $A^{-1}m^{-1}$

Ditanyakan : $\frac{F}{\ell}$ = ...?

Jawab : $\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$

$= \frac{4\pi.10^{-7}.10.20}{2\pi.10^{-1}}$

$= 4.10^{-4}$ N

Soal Latihan :

1. Dua buah kawat sejajar dialiri arus listrik yang sama besarnya dan terpisah pada jarak 1m. Pada kawat tersebut timbul gaya magnet sebesar 2.10^{-7} N/m, tentukan kuat arus listrik yang mengalir pada kawat tersebut!
2. Dua buah kawat penghantar sejajar terpisah sejauh 20 cm. Apabila pada kedua kawat tersebut timbul gaya magnet sebesar $2 . 10^{-5}$ N/m, tentukan berapa Ampere arus yang mengalir pada kawat kedua jika pada kawat pertama mengalir arus sebesar 4 A!

3. Gaya Magnetik yang Dialami oleh Muatan Listrik yang Bergerak dalam Medan Magnetik

Sebuah benda bermuatan listrik yang bergerak dalam medan magnetik juga akan mengalami gaya magnetik. Besarnya gaya magnetik yang dialami oleh benda bermuatan listrik dinyatakan :

$$F = B\,I\,\ell \sin\theta$$

$$F = B\frac{q}{t}\,\ell \sin\theta$$

$$F = Bq\frac{\ell}{t} \sin\theta$$

$$F = Bqv \sin\theta \qquad \text{.... (4.18)}$$

Di mana kuat arus

$I = \frac{q}{t}$ dan kecepatan

$v = \frac{\ell}{t}$

dengan :

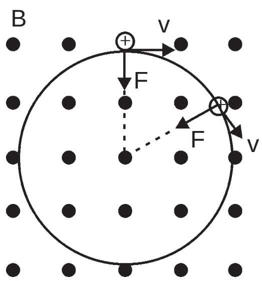
F = gaya magnetik (N)

B = induksi magnet (T)

q = besarnya muatan listrik (C)

v = kecepatan muatan listrik (m/s)

θ = sudut yang dibentuk oleh arah I dan v (m/s)



Gambar 4.11 Benda bermuatan masuk medan magnet dengan arah tegak lurus terhadap medan magnet menghasilkan lintasan berupa lingkaran.

Apabila benda bermuatan listrik memasuki medan magnet dengan arah tegak lurus medan magnet, maka benda bermuatan listrik tersebut akan bergerak dalam medan dengan lintasan yang berbentuk lingkaran. Hal tersebut dikarenakan gaya magnetik yang timbul akan berfungsi sebagai gaya sentri petal (F_s). Besarnya jari-jari lintasan yang ditempuh oleh muatan listrik dapat dihitung sebagai berikut :

$$F = Bqv$$

$$F_s = m\frac{v^2}{R}$$

Jadi : $Bqv = m\frac{v^2}{R}$

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad .... (4.19)$$

dengan :

R = jari -jari lintasan muatan listrik (m)
m = massa benda bermuatan listrik (kg)
v = kecepatan benda bermuatan listrik (m/s)
B = induksi magnet (T)
q = muatan listrik benda (c)

Contoh Soal

Sebuah partikel bermuatan sebesar 5.10^{-5} C bergerak dalam medan magnet 0,5 Wb/m^2 dengan kecepatan 2.10^4 m/s. Tentukan besarnya gaya magnetik yang dialami partikel tersebut jika arah geraknya membentuk sudut 30° terhadap medan magnet!

Penyelesaian :

Diketahui : $q = 5.10^{-5}$ C
$B = 5.10^{-1}$ Wb/m^2
$v = 2.10^4$ m/s
$\theta = 30°$

Ditanyakan : $F = ...?$

Jawab : $F = Bqv \sin \theta$
$= 5.10^{-1}.5.10^{-5}.2.10^4. \sin 30°$
$= 5.10^{-1} . \frac{1}{2}$
$= 0,25$ N

Jadi, besarnya gaya magnetik yang dialami partikel adalah 0,25 N.

Keingintahuan : Mencari Informasi

Dengan melewatkan partikel ke dalam medan magnet homogen akan menyebabkan partikel tersebut bergerak lebih cepat sehingga partikel tersebut dapat memiliki energi sampai 10 MeV. Peralatan yang menggunakan prinsip medan magnet yang berfungsi untuk meningkatkan tingkat energi partikel bermuatan listrik misalnya proton disebut siklotron atau betatron. Proton yang berenergi tinggi digunakan untuk mengganggu kestabilan inti yang stabil sehingga berubah menjadi inti atom yang radioaktif (radioisotop). Cobalah kalian jelaskan bagaimana prinsip kerja dari siklotron atau betatron tersebut? Carilah sumber dari buku literatur atau internet!

Soal Latihan :

1. Sebuah partikel bermuatan listrik positif sebesar 6.10^{-6} C bergerak dengan kecepatan 4 $.10^{5}$ m/s melewati medan magnet homogen 0,2 Wb/m^2. Tentukan besar gaya magnetik yang dialami partikel tersebut jika arah geraknya tegak lurus arah medan magnet!
2. Sebuah partikel yang mempunyai massa 300 miligram dan membawa muatan 2 $.10^{-8}$ C ditembakkan tegak lurus dan horisontal pada medan magnet yang serba sama dengan kecepatan 5.10^{4} m/s. Jika partikel tersebut tetap bergerak lurus tentukan besar induksi magnetnya!

C. Penerapan Gaya Magnetik dalam Industri

Pernahkah kalian memerhatikan tentang alat-alat listrik dan alat-alat ukur listrik? Bagaimana prinsip kerja dari alat tersebut?

Life Skills : Kecakapan Sosial

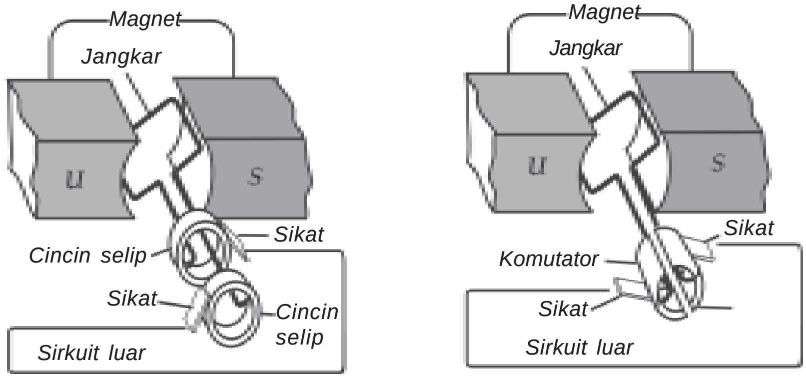
Sebutkan contoh alat-alat yang bekerja dengan prinsip gaya magnetik di lingkunganmu, dan jelaskan pula prinsip kerjanya!

Dalam kehidupan sehari-hari kita sering menggunakan peralatan-peralatan listrik yang didukung oleh motor listrik, antara lain pompa air, mesin cuci, kipas angin, mesin jahit, dan sebangainya. Sedangkan untuk mengukur arus listrik digunakan amperemeter, untuk mengukur tegangan listrik digunakan voltmeter. Motor listrik, ampermeter, dan voltmeter adalah suatu alat listrik yang bekerja menggunakan prinsip gaya Lorentz. Prinsip kerja alat tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Motor Listrik

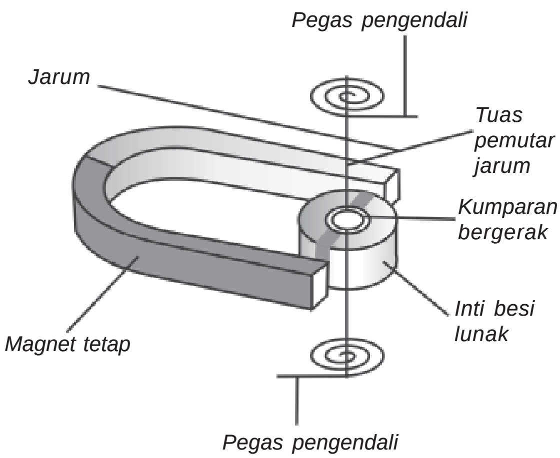
Motor listrik adalah alat listrik yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau energi gerak. Pada prinsipnya sebuah motor listrik terdiri atas dua bagian, yaitu bagian *stator* dan bagian *rotor*. Bagian stator yaitu bagian dari motor listrik yang tidak bergerak, pada umumnya terdiri atas magnet tetap. Bagian rotor yaitu

bagian motor listrik yang bergerak, pada umumnya terdiri atas kumparan kawat yang dibelitkan pada jangkar. Pada prinsipnya sebuah motor listrik memiliki kumparan yang berada dalam medan magnet tetap. Apabila pada kumparan tersebut dialiri arus listrik, maka pada kumparan tersebut akan bekerja gaya magnetik (gaya Lorentz). Arah gaya magnet pada sisi kumparan antara kanan dan kiri mempunyai arah yang berbeda sehingga membentuk momen gaya (torsi). Dengan demikian akan menyebabkan kumparan tersebut berputar. **(**Lihat **Gambar 4.12)** berikut ini.



***Gambar 4.12** Susunan dasar motor listrik*

2. Alat-Alat Ukur Listrik



***Gambar 4.13** Bagian-bagian alat ukur listrik*

Pada prinsipnya cara kerja antara alat ukur listrik dengan motor listrik sama, yaitu pemanfaatan dari gaya magnet. Perbedaannya pada ampermeter dan voltmeter, jangkar tempat kumparan dibelitkan ditaruh sebuah pegas yang berfungsi untuk meredam putaran dari kumparan, sehingga kumparan hanya akan terpuntir saja, di mana sudut puntiran kumparan akan sebanding dengan besarnya kuat arus yang mengalir pada kumparan tersebut. Besarnya sudut puntiran inilah yang dikalibrasikan untuk menentukan besaran yang akan diukur yang kemudian dibuatkan jarum penunjuk dan skala untuk hasil pengukuran.

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

Kamu disuruh untuk membelikan pompa air oleh tetanggamu. Padahal di pasaran banyak dijual berbagai macam merk pompa air. Coba jelaskan dengan singkat bagaimana usahamu untuk menentukan pilihan agar mendapatkan mesin pompa air yang kualitasnya baik?

Seputar Tokoh



Hans Christian Oersted (1777 - 1851), adalah seorang ilmuwan Denmark yang menemukan hubungan antara magnetisme dan listrik dan menyatakan bahwa Fisika sangatlah penting untuk memahami hal tadi. Dengan memanfaatkan hubungan yang erat antara magnetisme dan listrik, alat elektronik dapat menciptakan musik, gambar, atau bahkan gelombang radio. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Hukum Biot–Savart menyatakan bahwa besarnya induksi magnet di suatu titik di sekitar kawat berarus listrik :
   a. Berbanding lurus dengan kuat arus yang mengalir pada kawat tersebut.
   b. Berbanding lurus dengan panjang kawat penghantarnya.
   c. Berbanding lurus dengan sinus sudut yang dibentuk oleh arah arus dengan garis hubung dari suatu titik ke kawat penghantar.
   d. Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari titik itu ke kawat penghantar.
2. Besarnya kuat medan magnet di sekitar kawat lurus panjang beraliran arus listrik dinyatakan :

   $$B_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

3. Besarnya induksi magnet di sekitar kawat berbentuk lingkaran dinyatakan sebagai berikut :
   a. di titik pusat lingkaran

   $$B_p = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

   b. di titik pada sumbu lingkaran

   $$B_p = \frac{\mu_0 Ia \sin\alpha}{2r^2}$$ atau

   $$B_p = \frac{\mu_0 I \sin^3\alpha}{2a}$$

4. Besarnya induksi magnet di dalam selenoida dinyatakan :
   a. di ujung solenoida $B = \frac{\mu_0 In}{2}$
   b. di tengah-tengah solenoida

   $$B = \frac{\mu_0 IN}{L}$$

5. Besarnya induksi magnet di dalam toroida dinyatakan : $B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi r}$ di mana $2\pi r$ = keliling toroida.
6. Sebuah kawat penghantar yang berada dalam medan magnetik akan mendapat gaya Lorentz (gaya magnetik) sebesar : $F = B\, I\, \ell \sin \theta$.
7. Besarnya gaya magnet yang dialami oleh dua kawat penghantar beraliran arus listrik dinyatakan :

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi a}$$

8. Besarnya gaya magnet yang dialami oleh partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet dinyatakan : $F = B\, q\, v \sin \theta$.
9. Lintasan partikel bermuatan listrik yang memasuki medan listrik secara tegak lurus akan berupa lingkaran yang jari-jari lintasannya dapat dinyatakan : $R = \frac{mv}{Bq}$

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Sebuah kawat yang lurus berarus listrik 10 A. Sebuah titik berada 4 cm dari kawat. Jika $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ WbA^{-1}m^{-1}, maka kuat medan di titik tersebut adalah ....
   A. $0,5 \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}
   B. $1,0 \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}
   C. $3,14 \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}
   D. $4,0 \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}
   E. $5,0 \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}
2. Kawat lurus panjang diletakkan horisontal dari selatan ke utara. Jika arus listrik dialirkan dari selatan, maka arah medan magnet tepat di atas kawat menuju ....
   A. ke barat
   B. ke timur
   C. ke utara
   D. ke atas
   E. ke bawah
3. Dalam solenoida mengalir arus yang tetap. Besar induksi magnetik di salah satu ujungnya adalah B. Jika lilitannya ditambah sehingga jumlahnya menjadi 2 kali semula dan panjangnya menjadi 1,2 kali semula, maka induksi magnetik di tempat tersebut menjadi sekitar ....
   A. 0,17 kali semula
   B. 0,60 kali semula
   C. 1,67 kali semula
   D. 2,40 kali semula
   E. 6 kali semula

4. Suatu solenoida panjangnya 2 m dengan 800 lilitan dan jari-jarinya 2 cm. Apabila solenoida dialiri arus sebesar 0,5 A, maka induksi magnetik pada ujung solenoida .... ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb.A^{-1}.m^{-1})
   A. $4\pi \times 10^{-5}$ Wb.m^{-2}
   B. $8\pi \times 10^{-7}$ Wb.m^{-2}
   C. $4\pi \times 10^{-8}$ Wb.m^{-2}
   D. $8\pi \times 10^{-5}$ Wb.m^{-2}
   E. $2\pi \times 10^{-4}$ Wb.m^{-2}

5. Dua kawat lurus panjang terpisah sejauh 100 cm, masing-masing dilalui arus yang arahnya berlawanan, yaitu 2 ampere dan 3 ampere, maka besar gaya per satuan panjang yang dialami kedua kawat adalah ....
   A. $1,2 \times 10^{-7}$ N.m^{-1}
   B. $1,2 \times 10^{-6}$ N.m^{-1}
   C. 6×10^{-6} N.m^{-1}
   D. $1,2 \times 10^{-5}$ N./m^{-1}
   E. 6×10^{-5} N.m^{-1}

6. Dua kawat sejajar terpisah pada jarak 10 cm dan setiap kawat berarus 4 A dengan arah yang berlawanan. Sebuah titik P sebidang dengan kawat-kawat tersebut, berada 2 cm di antara dua kawat. Besarnya induksi magnetik sebesar ....
   A. 10^{-5} Tesla
   B. 2×10^{-5} Tesla
   C. 3×10^{-5} Tesla
   D. 4×10^{-5} Tesla
   E. 5×10^{-5} Tesla

7. Dua buah kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus sama besar dengan arah yang sama, sehingga timbul gaya sebesar 5×10^{-7}N.m^{-1}. Jika jarak antara dua kawat 100 cm, besar arus dalam setiap kawat adalah ....
   A. 0,05 A
   B. 0,25 A
   C. 0,50 A
   D. 1,00 A
   E. 2,50 A

8. Sebuah zarah bermuatan listrik bergerak dan masuk ke dalam medan magnet sedemikian rupa sehingga lintasannya berbentuk lingkaran dengan jari-jari 10 cm. Jika zarah lain bergerak dengan laju 1,2 kali zarah pertama, maka jari-jari lintasannya 20 cm. Ini berarti bahwa perbandingan antara massa per muatan zarah pertama dengan zarah kedua adalah ....
   A. 3 : 5
   B. 4 : 5
   C. 1 : 2
   D. 5 : 6
   E. 5 : 4

9. Dua titik A dan B berada di sekitar kawat lurus berarus listrik I. Jarak titik tersebut dari kawat masing-masing 6 cm dan 9 cm. Maka besar perbandingan induksi magnetik antara titik A dengan titik B adalah ....
   A. 1 : 2
   B. 2 : 1
   C. 2 : 3
   D. 3 : 1
   E. 3 : 2

10. Sebuah elektron bergerak sejajar dengan kawat berarus 10 A, pada jarak 2 cm, dengan kecepatan 4.10^5 m/s. Besar gaya Lorentz yang dialami elektron (e = $1,6 \times 10^{-19}$C) adalah ....

A. $1,6 \times 10^{-18}$N
B. $3,2 \times 10^{-18}$N
C. $6,4 \times 10^{-18}$N
D. $3,2 \times 10^{-19}$N
E. $6,4 \times 10^{-19}$N

B. Kerjakan soal di bawah ini!

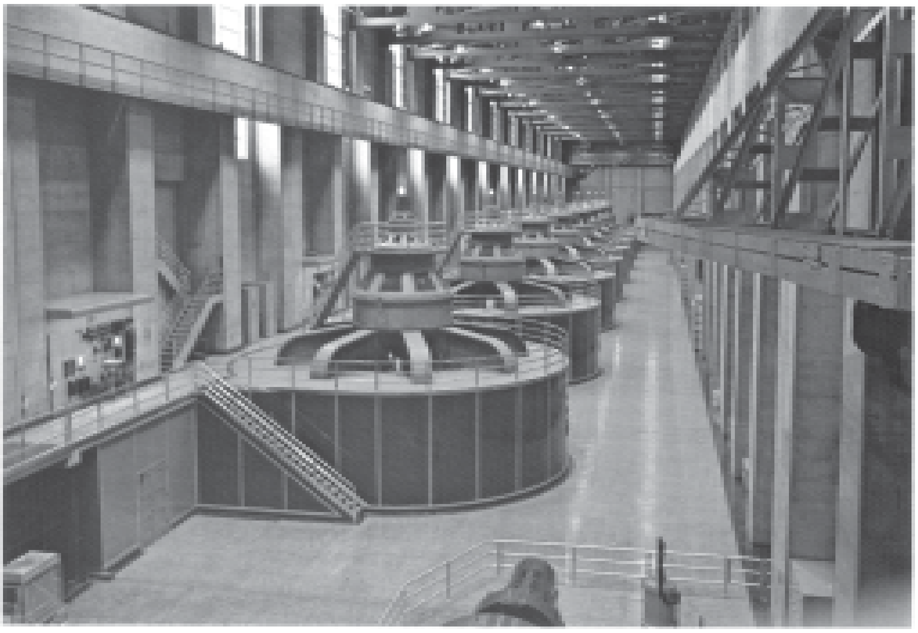
1. Sebutkan faktor apa saja yang memengaruhi besarnya induksi magnet di suatu di dekat kawat berarus listrik!
2. Dua buah kawat penghantar sejajar terpisah pada jarak 12 cm yang dialiri arus listrik masing-masing 2 A dan 4 A. Tentukan besarnya induksi magnet di titik P yang berjarak 4 cm dari kawat petama dan 8 cm dari kawat kedua jika:
   a. arus listrik dalam kawat searah, dan
   b. arus listrik dalam kawat berlawanan!
3. Sebuah kawat berarus listrik 20 Ampere berada dalam medan magnet B = 10^{-2} Wb.m^{-2}, panjang kawat 10 meter. Tentukan besarnya gaya magnet yang dialami kawat tersebut jika arah arus membentuk sudut 60^o terhadap medan magnet!
4. Sebuah solenoida terdiri atas 400 lilitan dan panjangnya 25 cm. Jika solenoida tersebut dialiri arus sebesar 10 A, tentukan besarnya induksi magnetik :
   a. di ujung solenoida, dan
   b. di tengah-tengah solenoida!
5. Sebuah elektron yang bergerak memasuki medan magnetik homogen secara tegak lurus dengan kelajuan 4×10^6 m/s. Apabila kuat medan magnet sebesar $4,55.10^{-5}$ Wb/m^2, massa elektron = $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan muatan elektron = $1,6 \times 10^{-19}$ C, tentukan berapa jari-jari lintasan elektron dalam medan magnet tersebut!

Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, kalian seharusnya memahami tentang :
1. formulasi medan magnet dan gaya magnet, dan
2. penerapan induksi magnet dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi.

Apabila ada hal-hal yang belum kalian pahami, pelajari kembali materi ini sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

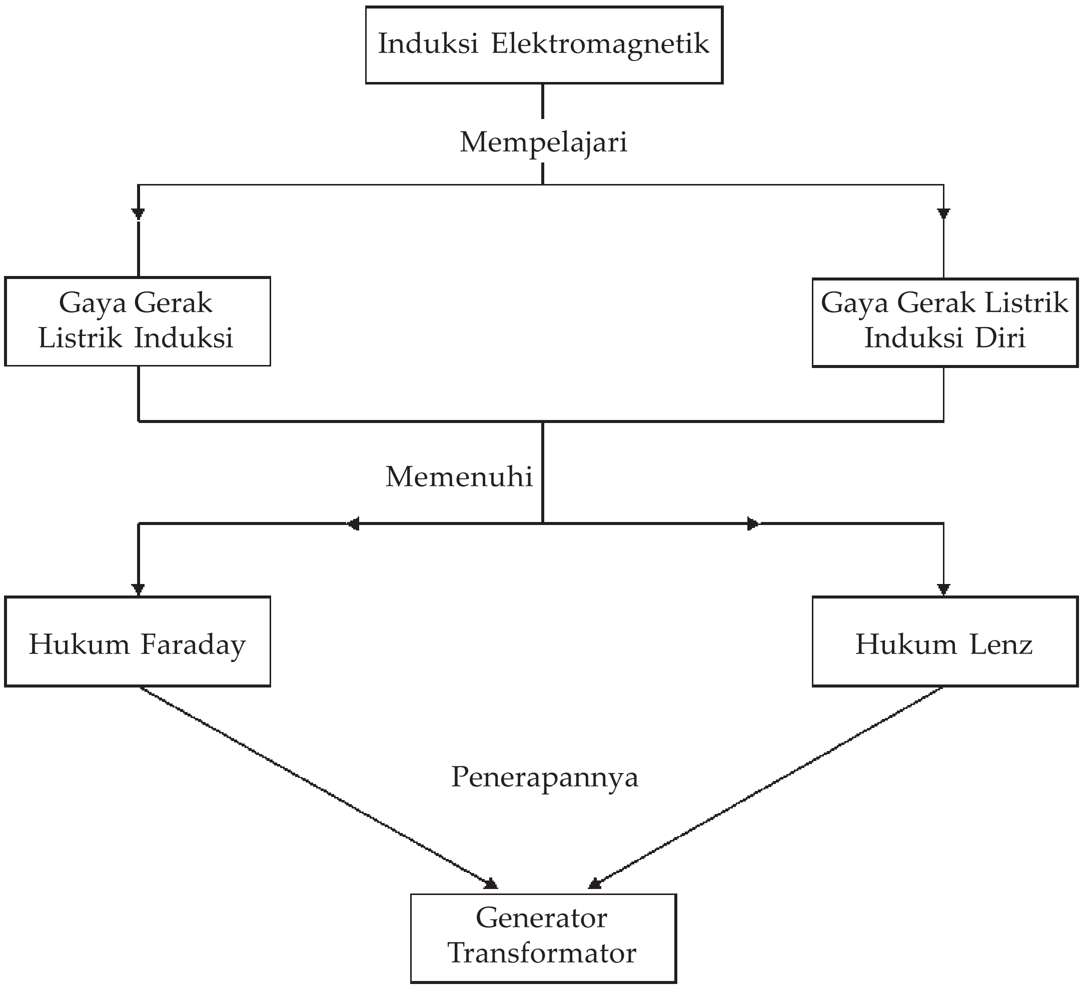
Bab V
Induksi Elektromagnetik



Sumber : Ilmu Pengetahuan Populer 6

Generator listrik menggunakan prinsip induksi magnet, yaitu menggunakan magnet-magnet yang kuat untuk menghasilkan arus listrik dalam gulung-gulungan kawat yang besar. Generator listrik itu bertanggung jawab untuk tenaga yang digunakan pada peralatan listrik, pemanasan, dan penerangan di rumah-rumah kita.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. memformulasikan konsep induksi Faraday,
2. memformulasikan konsep induksi diri, dan
3. menerapkan konsep ggl induksi dan ggl induksi diri pada generator dan transformator.

Motivasi Belajar

Dewasa ini kebutuhan manusia akan energi banyak ditopang oleh listrik. Penerangan, alat-alat rumah tangga, mesin-mesin pabrik banyak menggunakan energi listrik. Alat pembangkit energi listrik biasa disebut *generator*. Generator listrik didasarkan pada sifat-sifat elektromagnetik.
Untuk memahami bagaimana sifat-sifat elektromagnetik, maka pelajari materi bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

induksi, GGL, hukum Faraday, generator, induktansi diri, hukum Lenz, transformator, induktor Ruhmkorh

Pada bab IV, kita telah mempelajari tentang medan magnet yang ditimbulkan oleh magnet tetap dan medan magnet yang timbul di sekitar kawat penghantar beraliran arus listrik. Di mana untuk menggambarkan kuat medan dapat digunakan garis-garis gaya magnet, daerah yang memiliki medan magnet kuat digambarkan dengan garis gaya magnet yang rapat, sedangkan daerah yang medan magnetnya lebih kecil digambarkan dengan garis gaya magnet yang kurang rapat. Dekat dengan kutub-kutub magnet, garis-garis gayanya rapat, makin jauh dari kutub magnet makin jarang.

Apa yang terjadi apabila di sekitar kumparan kawat terjadi perubahan jumlah garis gaya magnet (medan magnet), misalnya dengan menggerakkan magnet keluar masuk dalam kumparan atau menggerakan kumparan di sekitar magnet? Ternyata pada ujung-ujung kumparan akan timbul beda potensial listrik. Apabila antar ujung-ujung kumparan dihubungkan dengan suatu penghantar atau ampermeter akan mengalir arus listrik.

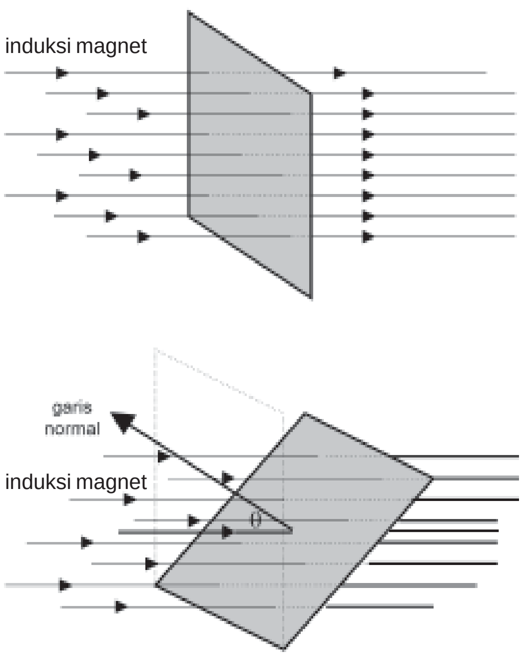
Adanya arus listrik ditunjukkan dengan bergeraknya jarum amperemeter, terjadinya arus listrik hanya terjadi pada saat ada gerak relatif antara magnet dengan kumparan, arus tidak terjadi jika kumparan dan magnet sama-sama diam. Peristiwa timbulnya beda potensial pada ujung-ujung kawat penghantar bila terjadi perubahan jumlah garis-garis gaya magnet yang dilingkupi kumparan dinamakan *induksi elektromagnetik*. Beda potensial yang terjadi pada ujung-ujung kumparan disebut *ggl induksi (gaya gerak listrik induksi)* dan arus listrik yang timbul disebut *arus listrik induksi*. Peristiwa ini pertama kali diselidiki pada tahun 1831 oleh dua orang ilmuwan fisika di tempat yang berbeda, tetapi dalam waktu yang hampir bersamaan yaitu **Michael Faraday** di Inggris dan **Yoseph Henry** di Amerika Serikat.

Dalam bab ini kita akan mempelajari lebih lanjut tentang induksi elektromagnetik. Induksi elektromagetik ini merupakan dasar dari kerja dinamo atau generator dan peralatan listrik lainnya, misalnya transformator.

A. GGL Induksi

1. Pengertian Fluks Magnetik

Konsep tentang fluks magnetik pertama kali dikemukaan oleh ilmuwan Fisika yang bernama **Michael Faraday** untuk menggambarkan medan magnet. Ia menggambarkan medan magnet dengan menggunakan garis-garis gaya, di mana daerah yang medan magnetnya kuat digambarkan garis gaya rapat dan yang kurang kuat digambarkan dengan garis gaya yang kurang rapat. Sedangkan untuk daerah yang memiliki kuat medan yang homogen digambarkan garis-garis gaya yang sejajar. Garis gaya magnet dilukiskan dari kutub utara magnet dan berakhir di kutub selatan magnet. Untuk menyatakan kuat medan magnetik dinyatakan dengan lambang *B* yang disebut dengan *induksi magnet*, induksi magnetik menyatakan kerapatan garis gaya magnet. Sedangkan fluks magnetik menyatakan banyaknya jumlah garis gaya yang menembus permukaan bidang secara tegak lurus, yang dapat dinyatakan dalam persamaan, sebagai berikut.



Gambar 5.1 *Garis medan magnetik yang menembus permukaan bidang (a) arah B tegak lurus bidang, (b) arah B tidak tegak lurus permukaan bidang*

$$\Phi = \vec{B}.\vec{A} \quad \text{.... (5.1)}$$

atau

$$\Phi = B\ A \cos\theta \quad \text{.... (5.2)}$$

Persamaan (5.2) dipakai apabila arah *B* tidak tegak lurus permukaan bidang.

dengan

Φ = fluks magnetik (Wb = weber)

B = induksi magnet (T atau WB.m^{-2})

A = luas permukaan bidang (m^2)

θ = sudut yang dibentuk antara arah B dengan garis normal (radian atau derajat)

Contoh Soal

Sebuah bidang seluas 200 cm^2 berada dalam medan magnet yang mempunyai kuat medan magnet sebesar 8 x 10^{-2} T. Tentukan fluks magnetik pada bidang tersebut apabila garis normal bidang dengan garis gaya magnet membentuk sudut :

a. 30^o
b. 60^o
c. 90^o

Penyelesaian :

a. $\Phi = BA \cos\theta = 8 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^{-2} \times \cos 30^o$

$$= 16 \times 10^{-4} \times \frac{1}{2}\sqrt{3} = 83 \text{x } 10^{-4} \text{ Weber}$$

b. $\Phi = BA \cos\theta = 8 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^{-2} \times \cos 60^o$

$$= 16 \times 10^{-4} \times \frac{1}{2} = 8 \times 10^{-4} \text{ Weber}$$

c. $\Phi = BA \cos\theta = 8 \times 10^{-2} \times 2 \times 10^{-2} \times \cos 90^o$

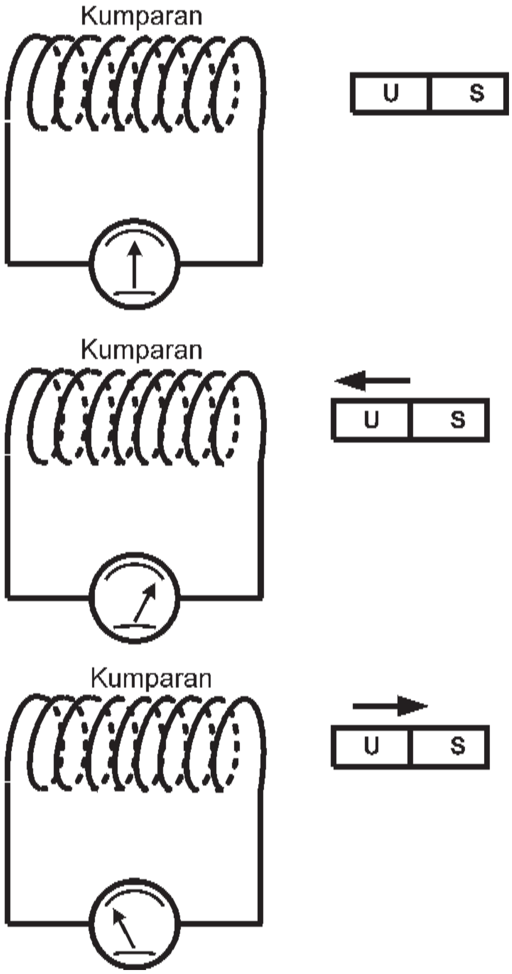
$$= 16 \times 10^{-4} \times 0 = 0 \text{ Weber}$$

2. Hukum Faraday

Perhatikan **Gambar (5.2)**. Apabila magnet batang digerakkan mendekati kumparan, maka jarum galvanometer akan menyimpang ke kanan dan sebaliknya jika magnet batang digerakkan menjauhi kumparan, maka jarum galvanometer akan menyimpang ke kiri. Akan tetapi jika magnet batang diam tidak digerakkan, jarum galvanometer juga diam.

Jarum galvanometer yang bergerak menunjukkan adanya arus listrik yang timbul di dalam kumparan pada saat terjadi gerak relatif pada magnet batang atau kumparan.

Peristiwa ini disebut *induksi elektromagnetik*, yaitu timbulnya ggl pada ujung-ujung kumparan yang disebabkan adanya perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan, ggl yang timbul disebut *ggl induksi*. Berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan oleh Faraday menyimpulkan bahwa *besarnya ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan tergantung pada kecepatan perubahan fluks magnetik yang dilingkupinya*. Kesimpulan ini lebih dikenal dengan **hukum Faraday** yang berbunyi :



Gambar 5.2 *Percobaan Faraday untuk menyelidiki hubungan ggl induksi dengan kecepatan perubahan fluks magnetik*

Besarnya ggl induksi yang timbul antara ujung-ujung kumparan berbanding lurus dengan kecepatan perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan tersebut.

Secara matematik hukum faraday dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{.... (5.3)}$$

atau $$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{.... (5.4)}$$

Persamaan (5.4) dipakai jika perubahan fluks magnetik berlangsung dalam waktu singkat atau Δt mendekati nol.

dengan :

ε = ggl induksi pada ujung-ujung kumparan (Volt)

N = jumlah lilitan dalam kumparan

$\Delta\Phi$ = perubahan fluks magnetik (Wb)

Δt = selang waktu perubahan fluks magnetik (s)

$\frac{d\Phi}{dt}$ = laju perubahan fluks magnetik (Wb.s^{-1})

Tanda negatif pada persamaan untuk menyesuaikan dengan *hukum Lenz*.

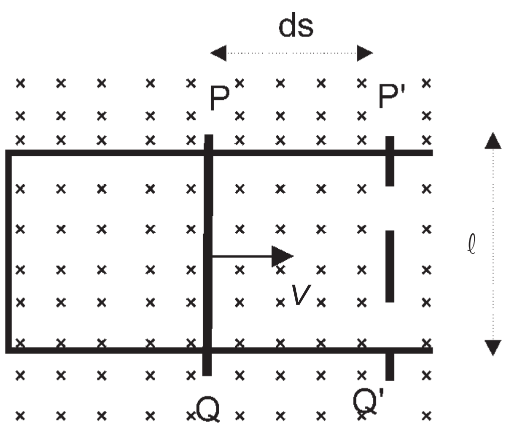
Berdasarkan persamaan (5.2) dapat diketahui bahwa ada tiga faktor yang mempengaruhi terjadinya perubahan fluks magnetik, yaitu :

a. Luas bidang kumparan yang melingkupi garis gaya medan magnetik.
b. Perubahan induksi magnetiknya.
c. Perubahan sudut antara arah medan magnet dengan garis normal bidang kumparan.

a. Besarnya GGL Induksi karena Perubahan Luas Penampang Bidang Kumparan

Untuk menyelidiki ggl induksi yang terjadi akibat perubahan luas penampang, perhatikan **Gambar (5.3)**. Sebuah kawat penghantar berbentuk huruf **U** yang di atasnya terdapat sebuah kawat penghantar (PQ) yang panjang ℓ yang mudah bergerak bebas pada kawat penghantar U. Kawat penghantar tersebut berada dalam medan magnet yang arahnya masuk bidang gambar.

Apabila kita menggerakkan kawat PQ ke kanan dengan kecepatan v akan menyebabkan terjadinya perubahan luas penampang bidang yang melingkupi garis gaya medan magnet. Apabila kawat PQ dalam selang waktu dt telah berpindah sejauh ds maka selama itu terjadi perubahan luas penampang sebesar $dA = \ell\, ds$, sehingga besarnya perubahan luas penampang per satuan waktu adalah :



Gambar 5.3 *Perubahan luas bidang kumparan akibat perpindahan penghantar PQ*

$$\frac{dA}{dt} = \ell\frac{ds}{dt} = \ell v$$

Sehingga besarnya ggl yang terjadi dapat dituliskan :

$$\varepsilon = -N.\frac{d\Phi}{dt} = -NB\frac{dA}{dt} = -NB\ell v$$

Jika pada kumparan hanya terdiri atas satu lilitan maka ggl induksi dapat dinyatakan :

$$\varepsilon = -B\,\ell\, v \qquad \text{.... (5.5)}$$

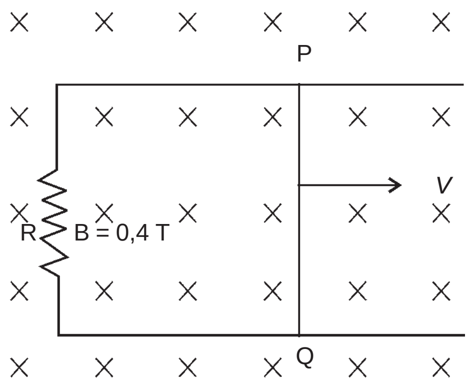
dengan :

ε = ggl yang terjadi (Volt)
B = Induksi magnetik (Wb/m^2)
ℓ = panjang kawat penghantar (m)
v = kecepatan kawat penghantar

Persamaan (5.5) berlaku untuk arah v tegak lurus B, jika arah v membentuk sudut terhadap B, maka menjadi :

$$\varepsilon = -B\,\ell\, v \sin\theta \qquad \text{.... (5.6)}$$

Contoh Soal



Perhatikan gambar di samping ini!

Jika kawat PQ panjangnya 50 cm digerakkan ke kanan dengan kecepatan 10 m/s. Hambatan R = 5 Ω dan induksi magnet sebesar 0,4 T, tentukan besarnya ggl induksi yang timbul dan kuat arus yang mengalir dalam rangkaian!

Penyelesaian :

$\varepsilon \;=\; B\,\ell\,v \sin\theta$

$\;\;= 0{,}4 \times 0{,}5 \times 10 \sin 90^{o}$

$\;\;= 2$ Volt

Jadi, besarnya ggl induksi yang terjadi adalah 2 Volt.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{2}{5} = 0{,}4 \text{ A}$$

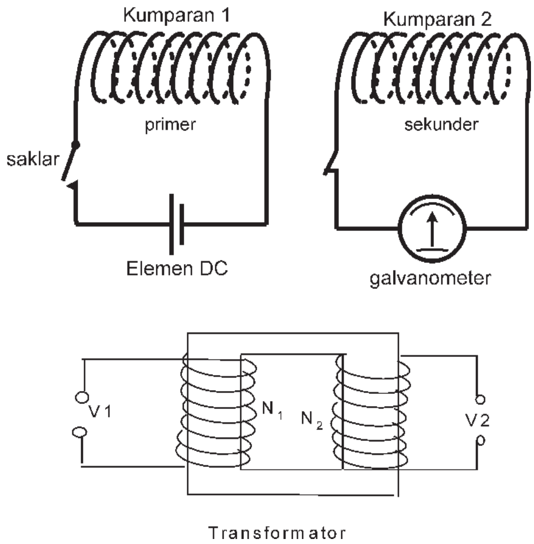
Jadi, besarnya kuat arus yang mengalir adalah 0,4 A.

Soal Latihan :

1. Sebuah kawat penghantar panjangnya 80 cm, bergerak dengan kecepatan 4 m/s dalam medan magnet tepat sebesar 0,5 Wb/m^2. Jika arah gerakan kawat membentuk sudut terhadap arah medan magnet, tentukan besarnya ggl yang terjadi pada ujung-ujung kawat tersebut!
2. Sebuah kawat penghantar yang panjangnya 50 cm bergerak memotong tegak lurus medan magnetik 0,2 Wb/m^2, sehingga pada ujung-ujung kawat timbul ggl induksi sebesar 2 Volt. Hitung berapa m/s kelajuan kawat tersebut!

b. GGL Induksi karena Perubahan Induksi Magnet

Perhatikan **Gambar (5.4)**, dua buah kumparan kawat yang saling berdekatan pada kumparan pertama dirangkai dengan sebuah baterai dan sakelar, sedangkan kumparan yang satunya dirangkai dengan galvanometer. Apabila sakelar ditutup terlihat bahwa jarum pada galvanometer bergerak, demikian juga pada saat sakelar dibuka. Dengan membuka



Gambar 5.4 *Prinsip kerja transformator*

dan menutup sakelar menyebabkan arus listrik yang mengalir pada kumparan I berubah. Karena arus listrik melalui kumparan I, maka akan menimbulkan perubahan medan magnet di sekitar kumparan. Perubahan medan magnet inipun terjadi pada kumparan II, sehingga pada kumparan timbul ggl induksi.

Besarnya ggl induksi yang disebabkan karena perubahan induksi magnet ini digunakan sebagai dasar dalam pembuatan transformator, secara matematik dapat dinyatakan :

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{dBA}{dt} = -NA\frac{dB}{dt} \quad ...(5.7)$$

Kumparan dalam transformator keduanya dibelitkan dalam tempat yang sama, sehingga memiliki luas penampang yang sama dan perubahan induksi magnet pada kedua kumparan sama. Dengan demikian perbandingan beda potensial (ggl) pada kedua ujung kumparan berbanding lurus dengan banyaknya lilitan pada kumparan tersebut, yaitu :

$\varepsilon_1 = N_1\dfrac{d\Phi_1}{dt}$ dan $\varepsilon_2 = N_2\dfrac{d\Phi_1}{dt}$ sehingga dapat dituliskan :

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1\dfrac{d\Phi_1}{dt}}{N_2\dfrac{d\Phi_1}{dt}} = \frac{N_1}{N_2}$$

dengan :

V_1 = tegangan listrik (ggl induksi) pada kumparan 1 (primer)

V_2 = tegangan listrik pada kumparan 2 (sekunder)

N_1 = jumlah lilitan pada kumparan 1 (primer)

N_2 = jumlah lilitan pada kumparan 2 (sekunder)

Contoh Soal

Sebuah kumparan yang mempunyai luas bidang kumparan 20 cm^2 terdiri atas 1000 lilitan, jika pada kumparan tersebut terjadi perubahan induksi magnet sebesar 5 Wb/m^2 per sekonnya, tentukan besarnya ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan tersebut!

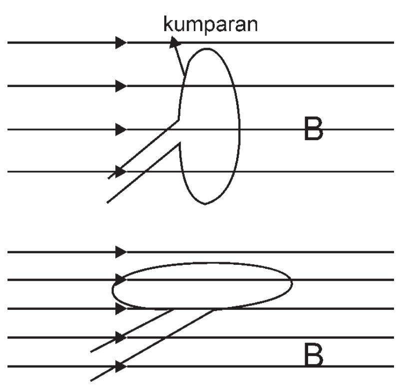
Penyelesaian :

$$\varepsilon = NA\frac{dB}{dt} = 1000 \times 2.10^{-3} \times 5 = 10 \text{ Volt}$$

Soal Latihan :

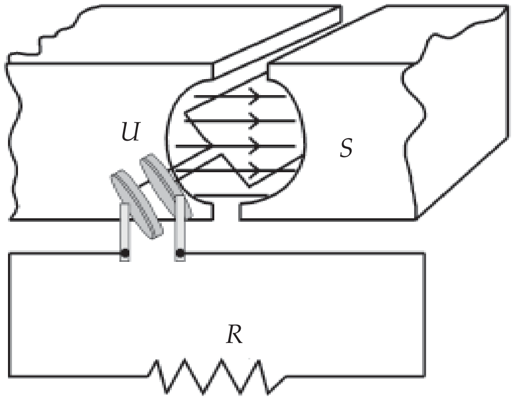
1. Pada ujung-ujung kumparan kawat yang terdiri atas 500 lilitan dengan luas penampang 200 cm^2. Apabila pada ujung-ujung kawat tersebut timbul ggl induksi sebesar 5 Volt, tentukan berapa kelajuan perubahan induksi magnet pada kumparan saat itu!
2. Pada kumparan yang memiliki luas penampang 500 cm^2 terjadi ggl induksi sebesar 15 Volt. Apabila induksi magnet di sekitar kumparan berubah dari 0,8 Wb/m^2 menjadi 0,2 Wb/m^2 selama 2 s. Hitunglah banyaknya lilitan pada kumparan!

c. GGL Induksi karena Perubahan Sudut antara B dan Garis Normal Bidang Kumparan



Gambar 5.5 *Perubahan sudut kumparan dengan medan magnet akan menghasilkan GGL induksi*

Perubahan fluks magnetik dapat juga terjadi jika sebuah kumparan diputar dalam medan magnet, sehingga akan terjadi perubahan jumlah garis gaya magnet yang dilingkupi oleh kumparan tersebut. Pada saat bidang kumparan tegak lurus arah medan magnet, maka fluks magnetik mencapai harga maksimum dan sebaliknya pada saat bidang kumparan sejajar arah medan magnet, maka fluks magnetik-nya akan mencapai harga minimum. Hal ini terlihat pada **Gambar (5.5)**.



Gambar 5.6 *Prinsip kerja generator*

Ggl induksi karena adanya perubahan sudut antara arah medan magnet dengan garis normal bidang kumparan merupakan dasar dari dibuatnya *dinamo* atau *generator*.

Secara matematik besarnya ggl dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{dBA\cos\theta}{dt}$$

$$= -BAN\frac{d\cos\theta}{dt}$$

Apabila kumparan diputar dengan laju anguler ω maka dalam selang waktu t sekon, garis normal bidang kumparan telah menempuh sudut sebesar $\theta = \omega t$ sehingga :

$$\varepsilon = -BAN\frac{d\cos\omega t}{dt} = -BAN\,\omega\,(-\sin\omega t) = BAN\,\omega\sin\omega t$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{Max}\sin\omega t \qquad \text{.... (5.8)}$$

dengan $\varepsilon_{Max} = BAN\,\omega$

di mana :

ε = ggl induksi (Volt)

B = induksi magnetik ($Wb.m^{-2}$)

A = luas bidang kumparan (m^2)

N = jumlah lilitan kumparan

ω = laju anguler ($rad.s^{-1}$)

ε_{Max} = ggl induksi maksimum (Volt)

t = lamanya kumparan berputar

Contoh Soal

Sebuah generator memiliki luas bidang kumparan 200 cm^2, yang terdiri atas 2000 lilitan, berada dalam medan magnetik tetap 5.10^{-3} T. Apabila kumparan diputar pada kecepatan sudut sebesar 500 rad/s, tentukan berapa volt ggl maksimum yang dihasilkan oleh generator tersebut?

Penyelesaian :

Diketahui : $B = 5.10^{-3}$ T

$A = 200\ cm^2 = 2 \times 10^{-2}\ m^2$

$N = 2000$ llt

$\omega = 500\ rad.s^{-1}$

Ditanyakan : $\varepsilon_{Max} = ?$

Jawab :

$\varepsilon_{Max} = BAN\ \omega = 5.10^{-3} \times 2.10^{-2} \times 2000 \times 500 = 100$ volt

Jadi, GGL maksimal yang dihasilkan generator adalah 100 volt.

Wawasan Produktivitas : Etos Kerja

Terjadinya gaya gerak listrik pada ujung-ujung suatu kumparan apabila pada kumparan itu terjadi perubahan fluks magnetik yang dilingkupi kumparan tersebut. Agar terjadi perubahan fluks magnetik yang dilingkupi kumparan maka harus ada gerakan relatif antara kumparan dengan magnet tetap. Buatlah sebuah generator listrik serta tuliskan prinsip kerjanya. Presentasikan hasil karyamu di depan kelas!

Soal Latihan :

1. Sebuah generator yang memiliki luas bidang kumparan 50 cm^2, dengan 2000 lilitan dan induksi magnet sebesar 0,2 Wb/m^2. Apabila pada ujung-ujung kumparan kawat timbul ggl induksi maksimum sebesar 200 volt. Hitunglah kecepatan sudut putaran generator tersebut!
2. Sebuah generator yang memiliki luas bidang kumparan A, jumlah lilitannya N, dan kata medan magnet tetapnya B. Apabila diputar dengan kecepatan sudut 1000 rad/s menghasilkan ggl maksimum sebesar 250 volt. Apabila luas penampang bidang kumparan dan induksi magnetnya dibuat menjadi $\frac{1}{2}$ dari semula dan jumlah lilitannya tetap. Tentukan berapa kecepatan sudut putaran generator tersebut agar tetap timbul ggl induksi maksimum sebesar 250 volt!

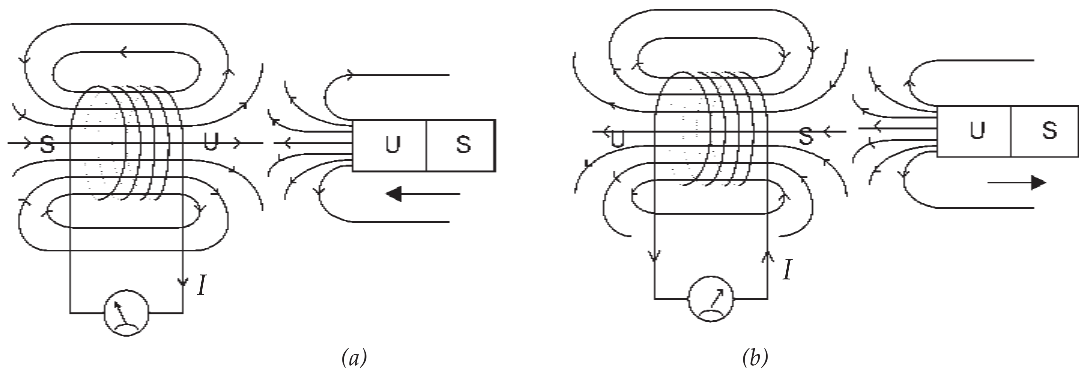
B. Hukum Lenz

Berdasarkan hukum Faraday, telah kita ketahui bahwa perubahan fluks magnetik akan menyebabkan timbulnya beda potensial antara ujung kumparan. Apabila kedua ujung kumparan itu dihubungkan dengan suatu penghantar yang memiliki hambatan tertentu akan mengalir arus yang disebut *arus induksi* dan beda potensial yang terjadi disebut *ggl induksi.* Faraday pada saat itu baru dapat menghitung besarnya ggl induksi yang terjadi, tetapi belum menentukan ke mana arah arus induksi yang timbul pada rangkaian/kumparan. Arah arus induksi yang terjadi baru dapat dijelaskan oleh **Friederich Lenz** pada tahun 1834 yang lebih dikenal dengan *hukum Lenz.*

Bunyi hukum Lenz adalah sebagai berikut :

Hukum

Jika ggl induksi timbul pada suatu rangkaian, maka arah arus induksi yang dihasilkan sedemikian rupa sehingga menimbulkan medan magnetik induksi yang menentang perubahan medan magnetik (arus induksi berusaha mempertahankan fluks magnetik totalnya konstan).

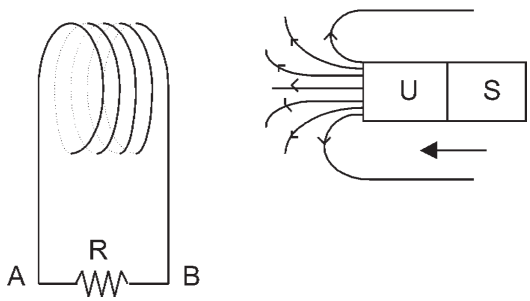


Gambar 5.7 *Arah arus induksi berdasarkan hukum Lenz (a) magnet mendekati kumparan, (b) magnet menjauhi kumparan.*

Untuk lebih memahami hukum Lenz, perhatikan **Gambar (5.7)**. Ketika kedudukan magnet dan kumparan diam, tidak ada perubahan fluks magnet dalam kumparan. Tetapi ketika *kutub utara magnet* digerakkan mendekati *kumparan*, maka timbul *perubahan fluks magnetik*. Dengan demikian pada kumparan akan timbul fluks magnetik yang menentang pertambahan fluks magnetik yang menembus kumparan. Oleh karena itu, arah fluks induksi harus

berlawanan dengan fluks magnetik. Dengan demikian fluks total yang dilingkupi kumparan selalu konstan. Begitu juga pada saat magnet digerakkan menjauhi kumparan, maka akan terjadi pengurangan fluks magnetik dalam kumparan, akibatnya pada kumparan timbul fluks induksi yang menentang pengurangan fluks magnet, sehingga selalu fluks totalnya konstan. Arah arus induksi dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan yaitu jika arah ibu jari menyatakan arah induksi magnet maka arah lipatan jari-jari yang lain menyatakan arah arus.

Contoh Soal



Perhatikan gambar di samping ini!

Apabila magnet digerakkan mendekati kumparan, tentukan ke mana arah arus listrik yang terjadi pada hambatan R!

Penyelesaian :

Karena magnet digerakkan mendekati kumparan, maka pada kumparan akan timbul ggl induksi yang menyebabkan timbulnya arus induksi pada kumparan, sehingga menyebabkan timbul medan magnet yang menentang medan magnet tetap, maka arah arus dalam kumparan/hambatan dari B ke A.

Life Skills : Kecakapan Personal

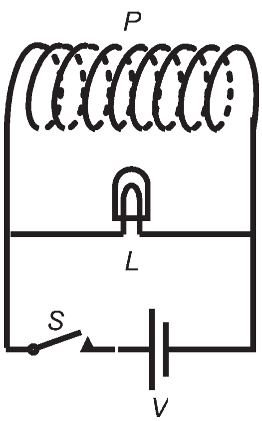
Sebuah generator memiliki luas penampang sebesar A cm^2, jumlah lilitan kawatnya N lilitan dan kuat induksi magnetnya B Wb/m^2 diputar dengan kecepatan sudut 1800 rpm sehingga menghasilkan tegangan maksimum sebesar 250 Volt. Apabila luas penampang kawat dijadikan ½A, lilitan kawatnya menjadi 2 N dan induksi magnetnya menjadi ¼B.

Tentukan berapa rpm kecepatan sudut putaran generator tersebut agar tetap menghasilkan tegangan maksimum sebesar 250 Volt?

C. GGL Induksi Diri

Dalam sebuah rangkaian listrik yang di dalamnya terdapat sebuah kumparan, misalnya rangkaian penyearah arus (adaptor) yang diperlengkapi dengan lampu indikator, apabila dalam posisi *on* kemudian kita matikan, maka lampu indikator tidak langsung padam, melainkan melalui redup dahulu baru kemudian padam. Coba perhatikan juga lampu pijar di rumah yang tiba-tiba terjadi pemutusan/pemadaman listrik dari pusat pembangkit listriknya, maka lampu pijar tersebut tidak langsung padam melainkan redup dahulu baru kemudian padam. Hal ini terjadi karena timbulnya *ggl induksi diri* dari kumparan yang ada dalam rangkaian listrik tersebut. Dalam sebuah kumparan yang dialiri arus bolak-balik, yaitu arus listrik yang besarnya selalu berubah-ubah maka akan menimbulkan fluks magnetik yang berubah-ubah terhadap waktu. Perubahan fluks magnetik ini akan menginduksi kumparan dalam rangkaian itu sendiri sehingga timbul ggl induksi. Ggl induksi yang terjadi karena adanya perubahan fluks magnetik yang ditimbulkan oleh rangkaian itu sendiri disebut *ggl induksi diri.*

1. GGL Induksi Diri pada Kumparan



***Gambar 5.8** GGL induksi diri pada kumparan menyebabkan lampu tidak langsung padam*

Perhatikan **Gambar (5.8),** sebuah kumparan P yang diparalel dengan lampu L, dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan V, dan diperlengkapi dengan saklar S. Pada kedudukan awal posisi sakelar terbuka, sehingga tidak ada arus listrik yang mengalir dalam rangkaian. Ketika sakelar ditutup, lampu akan langsung menyala, sebaliknya pada saat sakelar dibuka kembali ternyata lampu tidak langsung padam, tetapi melalui redup dahulu baru padam.

Bagaimana peristiwa ini terjadi?

Pada saat saklar ditutup maka pada kumparan P akan mengalir arus listrik yang menyebabkan timbul perubahan fluks magnetik dari nol mencapai nilai tertentu. Sebaliknya pada saat sakelar dibuka, arus listrik dalam rangkaian terputus, sehingga pada kumparan kembali terjadi perubahan fluks magnetik dari nilai tertentu kembali menjadi nol. Menurut hukum Lenz, timbulnya perubahan fluks magnetik akan menyebabkan timbulnya ggl induksi yang arahnya selalu berlawanan yang menyebabkan terjadinya perubahan fluks magnetik. Ggl induksi diri besarnya tergantung pada kecepatan perubahan kuat arus listrik yang

terjadi, arah arus induksi yang terjadi sedemikian rupa akan menimbulkan medan magnet yang berlawanan dengan medan magnet yang menyebabkan timbulnya perubahan fluks magnetik.

Besarnya ggl induksi diri yang terjadi dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\varepsilon = L\,\frac{dI}{dt} \qquad \text{.... (5.9)}$$

dengan L adalah induktansi diri yang memiliki satuan Henry (H).

Apabila perubahan kuat arus yang terjadi ($\frac{dI}{dt}$) konstan, maka persamaan (5.9) dapat dinyatakan :

$$\varepsilon = -L\,\frac{\Delta I}{\Delta t} = -L\left(\frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}\right) \qquad \text{.... (5.10)}$$

dengan :

ε = ggl induksi diri (Volt)

L = induktansi diri (Henry)

I_1 = kuat arus pada keadaan mula-mula (Ampere)

I_2 = kuat arus pada keadaan akhir (Ampere)

Δt = selang waktu perubahan kuat arus (sekon)

Persamaan (5.9) dapat juga ditulis menjadi $L = \frac{\varepsilon}{dI/dt}$, sehingga dari sini dapat untuk menyatakan definisi 1 Henry. Sebuah kumparan memiliki induktansi diri sebesar satu henry apabila pada kumparan tersebut terjadi perubahan arus sebesar 1 ampere tiap detiknya, maka pada ujung-ujung kumparan tersebut timbul ggl induksi sebesar 1 volt.

Contoh Soal

1. Jika pada sebuah kumparan terjadi perubahan kuat arus sebesar 0,5 A/s, pada ujung-ujung kumparan timbul ggl induksi diri sebesar 0,2 Volt, tentukan berapa Henry induktansi diri kumparan tersebut!

Penyelesaian :

$$L = \frac{\varepsilon}{dI/dt} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4 \text{ H}$$

2. Sebuah kumparan mempunyai induktansi diri sebesar 0,05 H, jika pada kumparan tersebut terjadi perubahan kuat arus listrik sebesar 10 A/s. Tentukan berapa ggl induksi diri yang timbul pada ujung-ujung kumparan tersebut!

   Penyelesaian :

$$\varepsilon = L\frac{dI}{dt} = 0,05 \text{ x } 10 = 0,5 \text{ volt}$$

Soal Latihan :

1. Sebuah kumparan (induktor) mempunyai induktansi sebesar 500 mH, apabila pada induktor tersebut terjadi perubahan kuat arus yang memenuhi persamaan $I = 2\ t^2 + 4t - 5$ ampere. Tentukan besarnya ggl induksi diri pada kumparan tersebut saat t = 2 sekon!
2. Pada sebuah induktor jika terjadi perubahan kuat arus dari 5 A menjadi 1A dalam waktu 0,2 sekon. Pada ujung-ujung kumparan timbul ggl induksi diri sebesar 10 Volt. Hitunglah induktansi induktor tersebut!

2. Energi yang Tersimpan pada Kumparan

Telah dijelaskan bahwa dalam kumparan yang dialiri arus listrik akan menyebabkan timbulnya medan magnet di dalam kumparan itu. Apabila arus yang mengalir diputus tiba-tiba maka dengan adanya perubahan fluks magnetik menyebabkan timbulnya ggl induksi diri yang menimbulkan arus induksi diri pada kumparan yang berarti dalam kumparan tersebut tersimpan *energi*. Energi yang tersimpan dalam kumparan dalam bentuk medan magnet. Besarnya energi yang tersimpan dalam kumparan dapat dicari sebagai berikut.

Besarnya usaha total yang dikeluarkan oleh suatu sumber tegangan (ggl induksi diri) dapat dinyatakan $W = \varepsilon I t$, untuk energi sesaat dalam selang waktu dt dapat dituliskan :

$$dW = \varepsilon\ I\ dt$$

Di mana ε adalah ggl induksi diri kumparan yang besarnya $L\ dI/dt$, maka kita peroleh :

$$dW = \left(L\frac{dI}{dt}\right) I\ dt$$

$$dW = L\ I\ dI$$

Besarnya energi yang tersimpan dalam kumparan sama dengan usaha yang dilakukan untuk mengalirkan arus listrik dalam kumparan dari nilai nol sampai nilai tertentu yang tetap sebesar I, dapat diperoleh dengan mengintegralkan persamaan tersebut sehingga diperoleh :

$$W = \int_0^W dW = \int_0^I LIdI$$

$$W = \frac{1}{2} L\ I^2 \quad \text{.... (5.11)}$$

dengan :

W = energi yang tersimpan dalam kumparan (Joule)

L = induktansi diri kumparan (Henry)

I = kuat arus yang mengalir dalam kumparan (Ampere)

Contoh Soal

Sebuah induktor mempunyai induktansi diri sebesar 0,5 H, apabila pada induktor tersebut dialiri kuat arus listrik sebesar 10 A, berapakah besarnya energi listrik yang tersimpan pada induktor tersebut?

Penyelesaian :

$$W = \frac{1}{2} L\ I^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}5 \times 10^2 = 25 \text{ Joule}$$

Soal Latihan :

1. Sebuah induktor dialiri arus listrik sebesar 10 A , ternyata energi yang tersimpan dalam induktor sebesar 2,5 joule. Hitunglah induktansi induktornya!
2. Sebuah induktor memiliki induktansi sebesar 300 mH dialiri arus listrik sehingga energi yang tersimpan pada induktor sebesar 1,35 joule. Tentukan berapa kuat arus yang mengalir pada induktor tersebut!

3. Induktansi Diri pada Solenoida dan Toroida

Telah dijelaskan pada bab III bahwa *solenoida* adalah kumparan yang panjang, sedangkan *toroida* adalah sebuah solenoida yang dibentuk melingkar. Seperti telah dijelaskan dalam hukum Faraday dan hukum Lenz adanya perubahan fluks magnetik menimbulkan ggl induksi dan adanya perubahan arus listrik yang mengalir dalam kumparan itu akan menimbulkan perubahan fluks magnetik juga, sehingga besarnya ggl induksi yang timbul pada kumparan dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan (5.4) dan (5.9), yaitu :

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} \text{ dan } \varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

Berdasarkan kedua persamaan itu akan didapatkan :

$$L\frac{dI}{dt} = N\frac{d\Phi}{dt}$$

$$LdI = Nd\Phi$$

$$L\int dI = N\int d\Phi$$

$$LI = N\Phi$$

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad \text{.... (5.12)}$$

Di mana $\Phi = B\,A$ dan telah dijelaskan pada bab yang lalu bahwa induksi magnetik pada solenoida atau toroida yaitu $B = \frac{\mu_0 IN}{\ell}$ dengan ℓ adalah panjang solenoida atau keliling toroida, sehingga persamaan (5.12) dapat dituliskan :

$$L = \frac{N\mu_0 INA}{I\ell} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

Apabila kumparan itu berintikan bahan dielektrikum tertentu, maka induktansi diri dinyatakan :

$$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell} \quad \text{.... (5.12)}$$

dengan :

L = induktansi diri (Henry)

N = jumlah lilitan pada kumparan

ℓ = panjang lilitan kumparan (meter)

A = luas penampang kumparan (m^2)

μ_0 = permeabilitas ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb $A^{-1}m^{-1}$)

μ = permeabilitas bahan, di mana $\mu = \mu_r \cdot \mu_o$ dengan μ_r adalah permeabilitas relatif bahan.

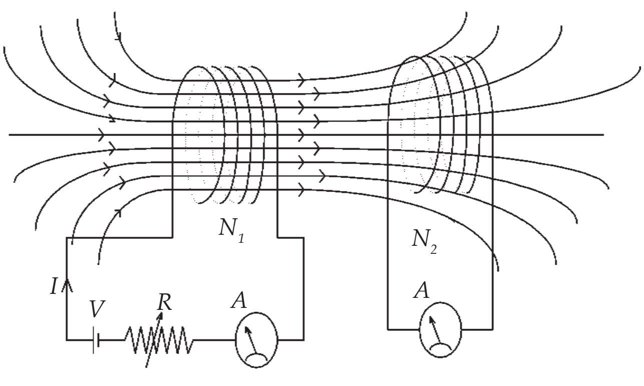
4. Induktansi Timbal Balik (Induktansi Silang)

Gambar (5.9) menunjukkan dua buah kumparan yang saling berdekatan. Apabila hambatan geser R (Rheostat) digeser-geser maka akan menyebabkan arus (dI_1/dt) yang melalui kumparan primer (1) akan berubah. Perubahan arus ini akan menyebabkan perubahan fluks magnetik ($d\Phi_1/dt$) pada kumparan primer (1). Akan tetapi perubahan fluks magnetik ini juga dialami oleh kumparan sekunder (2), sehingga pada kumparan timbul ggl induksi sebesar :

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{atau} \quad \varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \qquad \text{.... (5.14)}$$

Hal ini juga berlaku untuk sebaliknya, jika pada kumparan sekunder terjadi perubahan arus (dI_2/dt) maka akan terjadi perubahan fluks magnetik pada kumparan sekunder ($d\Phi_2/dt$), perubahan fluks magnetik ini juga dialami oleh kumparan primer sehingga pada kumparan primer akan terjadi ggl induksi sebesar :

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_2}{dt} \quad \text{atau} \quad \varepsilon_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \qquad \text{.... (5.15)}$$



Gambar 5.9 *Induktansi silang antara dua kumparan (kumparan primer dan sekunder*

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa adanya perubahan arus pada kumparan 1 (primer) akan menimbulkan ggl induksi pada kumparan 2 (sekunder) atau sebaliknya, peristiwa ini disebut *induksi timbal balik (induksi silang)*. Besarnya ggl induksi tergantung pada laju perubahan fluks magnetik atau laju perubahan arus dalam kumparan. Notasi M dalam persamaan (5.14) dan (5.15) tersebut menyatakan *induktansi timbal balik (induktansi silang)* antara kumparan primer dan kumparan sekunder yang memiliki satuan henry (H) dan besarnya dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$M = \frac{N_1 Q_2}{I_2} \text{ atau } M = \frac{N_2 Q_1}{I_1} \quad \text{.... (5.16)}$$

Apabila fluks magnetik yang ditimbulkan arus sebesar I_1 yang mengalir pada kumparan yang terdiri atas N_1 lilitan dengan luas penampang bidang kumparan A maka $\Phi_1 = B_1 A = \frac{\mu_0 I_1 N_1 A}{\ell}$ jika nilai ini disubstitusikan pada persamaan (5.16) akan kita dapatkan :

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{\ell} \quad \text{.... (5.17)}$$

dengan :

M = induktansi silang/timbal balik (H)
μ_0 = permeabilitas ruang hampa/udara
N_1 = banyaknya lilitan kumparan 1
N_2 = banyaknya lilitan kumparan 2
A = luas bidang kumparan (m^2)
ℓ = panjang kumparan (m)

Definisi 1 Henry

Sepasang kumparan memiliki induktansi silang sebesar 1 henry apabila terjadi perubahan arus sebesar 1 ampere tiap detik pada kumparan yang satu akan menyebabkan timbulnya ggl induksi pada ujung-ujung kumparan yang lainnya sebesar 1 volt.

Wawasan Kebhinekaan : Kekayaan Potensi

Pada saat ini kebutuhan tenaga listrik di Indonesia semakin lama semakin meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut pemerintah telah berusaha untuk membangun proyek-proyek pembangkit tenaga listrik dengan memanfaatkan sumber energi yang tersedia di alam Indonesia ini. Cobalah kamu cari data berapa persen perbandingan antara pemakaian sumber bahan bakar (minyak, batubara, tenaga air, panas bumi, sinar matahari, dan nuklir) untuk menggerakkan/ menjalankan mesin-mesin pembangkit tenaga listrik di Indonesia. Dari penggunaan bahan bakar tersebut manakah yang mempunyai persentase paling besar untuk mencukupi energi listrik di Indonesia? Informasi dapat kamu cari dari internet atau datang langsung tanyakan di kantor PLN terdekat!

Contoh Soal

Sepasang kumparan/ induktor yang saling berdekatan, apabila pada kumparan pertama terjadi perubahan kuat arus listrik sebesar 10 A/s akan menyebabkan timbulnya ggl induksi pada kumparan kedua sebesar 3 volt, tentukan berapa H besarnya induktansi timbal balik kumparan tersebut!

Penyelesaian :

$$M = \frac{\varepsilon}{\frac{dI}{dt}} = 0{,}3 \text{ H}$$

Jadi, induktansi timbal balik kumparan adalah 0,3 H.

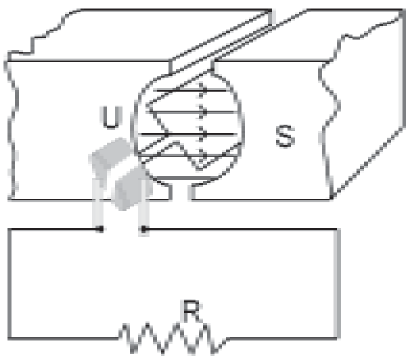
D. Penerapan Induksi Magnetik di dalam Bidang Teknologi

Pada zaman modern saat ini hampir semua pekerjaan kantor dilakukan menggunakan peralatan-peralatan yang dijalankan dengan menggunakan energi listrik, seperti halnya penggunaan komputer, AC, menjalankan mesin-mesin produksi, lampu penerangan, dan hubungan dengan pihak luar untuk kerja sama dan transaksi dengan memanfaatkan jaringan internet dan sebagainya. Demikian juga terjadi di daerah pedesaan yang saat ini sudah sebagian besar penduduknya menggunakan energi listrik dalam melakukan

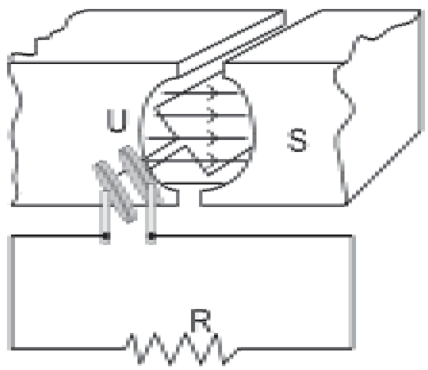
kegiatan sehari-hari seperti halnya memasak, menjalankan bisnis menjahit, meubel, dan membuat kerajinan tangan dengan menggunakan alat-alat listrik.

Oleh karena itu, sampai saat ini pemerintah terus berusaha untuk memenuhi kebutuhan akan energi listrik bagi kesejahteraan rakyatnya dengan membangun proyek-proyek pembangkit tenaga listrik. Tenaga listrik dihasilkan oleh generator (dinamo) yang ukurannya besar dan untuk menggerakkannya diperlukan energi yang sangat banyak/besar. Berdasarkan sumber energi yang menggerakkannya dibedakan menjadi PLTA, PLTG, PLTU, PLTD, dan PLTN. Pada umumnya sumber energi yang tersedia di alam terdapat di daerah pegunungan yang jauh dari perkotaan. Oleh karena itu, untuk mengirimkan energi yang dihasilkan ke kota-kota diperlukan jaringan transmisi. Agar tidak banyak energi yang hilang dalam transmisi energi tersebut menggunakan tegangan yang tinggi. Untuk menaikkan tegangan listrik tersebut diperlukan transformator. Generator dan transformator merupakan peralatan teknologi yang bekerja berdasarkan induksi Faraday atau induksi elektromagnetik.

1. Generator (Dinamo)



Gambar 5.10 *Sketsa generator DC*



Gambar 5.11 *Sketsa generator AC*

Generator atau dinamo adalah alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik. Pada prinsipnya generator terdiri atas kumparan kawat dan magnet tetap/permanen. Bagian dari generator dapat dibedakan menjadi dua, yaitu *rotor* dan *stator*, *rotor* yaitu bagian generator yang bergerak, sedangkan stator merupakan bagian generator yang diam. Di dalam generator terdapat *cincin luncur*, yaitu bagian yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik keluar dan bagian ini adalah tempat untuk mengikatkan

ujung-ujung kawat kumparan. Generator dibedakan menjadi dua, yaitu *generator arus AC* dan *generator arus DC*. Cobalah kalian selidiki apa yang menjadi ciri khas perbedaan antara generator arus AC dan generator arus DC, diskusikan dengan temanmu!

Besarnya ggl induksi yang terjadi pada generator dinyatakan dalam persamaan :

$$\varepsilon = \varepsilon_{Max} \sin \omega t$$

di mana

$$\varepsilon_{Max} = BAN\,\omega$$

dengan :

ε = ggl induksi (Volt)

B = induksi magnet (Wb /m^{-2})

A = luas bidang kumparan (m^2)

N = jumlah lilitan kumparan

w = laju anguler (rad s^{-1})

ε_{Max} = ggl induksi maksimum (Volt)

t = lamanya kumparan berputar

Contoh Soal

1. Sebuah genarator yang memiliki kumparan dengan luas penampang 200 cm^2, terdiri atas 500 lilitan diputar dengan kecepatan sudut 1250 rad/s. Apabila kuat medan magnet pada generator tersebut 2.10^{-3} Wb/m^2, tentukan berapa ggl maksimum yang dihasilkan generator tersebut!

Penyelesaian :

Diketahui : $A = 200 \text{ cm}^2 = 2 \,.10^{-2} \text{ m}^2$

$N = 500$ lilitan

$\omega = 1250 \text{ rads}^{-1}$

$B = 2.10^{-3} \text{ Wb.m}^{-2}$

Ditanyakan : ε_{Max} = ...?

Jawab : $\varepsilon_{Max} = BAN\,\omega$

$= 2 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^{-2} \times 500 \times 1250$ Volt

$= 25$ volt

Jadi, besarnya ggl maksimum yang dihasilkan generator adalah 25 volt.

2. Sebuah generator yang memiliki luas bidang kumparan 400 cm^2 terdiri atas 1000 lilitan dengan kuat medan magnetnya 5.10^{-4} Wb/m^2, diputar dengan kecepatan sudut 500 rad/s. Tentukan besarnya ggl yang timbul pada saat garis normal bidang kumparan membentuk sudut 30^o terhadap arah medan magnet!

Penyelesaian :

Diketahui : A = 400 cm^2 = (4×10^{-2} m^2)

N = 1000 lilitan

$B = 5 \times 10^{-4}$ Wbm^{-2}

ω = 500 $rads^{-1}$

$\theta = \omega t = 30^o$

Ditanyakan : ε = ...?

Jawab : $\varepsilon = BAN\,\omega \sin \omega t$

$= 5 \times 10^{-4} \times 4 \times 10^{-2} \times 10^3 \times 5 \times 10^2 \times \sin 30^o$

$= 10 \cdot \frac{1}{2}$

= 5 volt

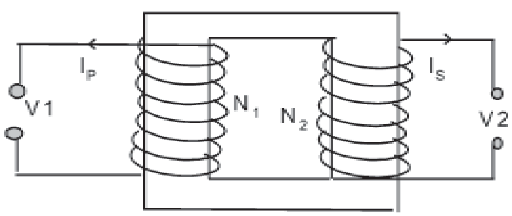
Jadi, besarnya ggl yang timbul adalah 5 volt.

Latihan Soal :

Hitunglah frekuensi perputaran sebuah kumparan dengan 500 lilitan (masing-masing dengan luas 20 cm^2). Pada suatu medan magnetik $7{,}0 \times 10^{-5}$ T untuk membangkitkan tegangan yang mempunyai nilai maksimum (suatu amplitudo) 0,5 V!

2. Transformator (Trafo)

Transformator berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik. Transformator bekerja berdasarkan induksi Faraday. Transformator dibedakan menjadi dua, yaitu *transformator step down* dan *transformator step up*. Coba kalian jelaskan perbedaan fungsi dari kedua jenis transformator tersebut! Pada prinsipnya transformator bekerja pada arus AC dan tidak bekerja



Gambar 5.12 *Transformator*

pada arus DC, mengapa demikian? Coba diskusikan dengan temanmu! Transformator pada prinsipnya berfungsi untuk mentransfer energi listrik dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Idealnya transfer energi tersebut tidak kehilangan energi, tetapi kenyataannya ada sebagian energi yang hilang menjadi energi kalor, sehingga pada transformator dikenal *efisiensi transformator* yaitu perbandingan antara daya pada kumparan sekunder dengan daya pada kumparan primer. Pada transformator berlaku :

$$V_P : V_S = N_P : N_S$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} = \frac{I_s \times V_s}{I_p \times V_p}$$

di mana :

V_P = tegangan pada kumparan primer
V_S = tegangan pada kumparan sekunder
N_P = jumlah lilitan pada kumparan primer
N_S = jumlah lilitan pada kumparan sekunder
I_P = arus listrik yang mengalir pada kumparan primer
I_S = arus listrik yang mengalir pada kumparan sekunder
P_P = daya listrik pada kumparan primer
P_S = daya listrik pada kumparan sekunder
η = efisiensi transformator yang biasanya dinyatakan dalam %

Selain pada generator dan transformator, induksi magnetik juga diterapkan pada relay, head pada tape, bel listrik, induktor Ruhmkorf, dan sebagainya.

Life Skills : Kecakapan Sosial

Kalian telah mempelajari tentang generator listrik. Cobalah kalian membuat sebuah pembangkit listrik (generator) sederhana dengan tenaga angin atau air sebagai penggerak generator. Manfaatkan alat dan bahan yang ada di sekitar kalian. Diskusikanlah dengan guru kalian jika mengalami kesulitan!

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

Buatlah sebuah bel listrik dan buatlah skema alurnya serta tuliskan prinsip kerjanya, kemudian presentasikan di depan kelas!

Contoh Soal

1. Sebuah transformator memiliki perbandingan antara lilitan primer dan sekunder 15 : 2. Jika kumparan primer terdiri atas 750 lilitan dan dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar 150 volt. Hitunglah jumlah lilitan sekunder dan tegangan pada kumparan sekunder!

   Penyelesaian :

   Diketahui : $N_p : N_s = 15 : 2$
   $N_p = 750$ lilitan
   $V_p = 150$ Volt

   Ditanyakan : a. $N_s = ...?$
   b. $V_s = ... ?$

   Jawab : a. $N_p : N_s = 15 : 2$
   $15 \text{ N}_s = 2 \text{ N}_p$
   $$N_s = \frac{2}{15} N_p = \frac{2}{15}.750 \text{ lilitan}$$
   $$= 100 \text{ lilitan}$$
   Jadi, jumlah lilitan sekunder adalah 100 lilitan.

   b. $V_p : V_s = N_p : N_s$
   $$V_s = \frac{\text{N}_s}{\text{N}_p}. V_p = \frac{2}{15}. 150 \text{ Volt}$$
   $$= 20 \text{ Volt}$$

   Jadi, besarnya tegangan pada kumpan sekunder adalah 20 volt.

2. Sebuah transformator memiliki efisiensi 80 % dan kumparan primer dihubungkan pada tegangan 300 volt, ternyata pada kumparan sekunder timbul tegangan sebesar 30 Volt. Apabila pada kumparan primer mengalir arus sebesar 0,5 A, tentukan berapa ampere arus yang mengalir pada kumparan sekundernya!

   Penyelesaian :

   Diketahui : $\eta = 80$ %
   $V_p = 300$ Volt
   $V_s = 30$ Volt
   $I_p = 0,5$ A

   Ditanyakan : $I_s = ...?$

Jawab : $\eta = \dfrac{I_s.V_s}{I_p.V_p}$

$$I_s = \frac{\eta.I_p.V_p}{V_s}$$

$$= 80\ \% \ . \ \frac{0{,}5.300}{30}$$

$$= 0{,}8\ .\ 5 = 4\ \text{A}$$

Jadi, besarnya arus yang mengalirkan pada kumparan sekunder adalah 4 A.

Wawasan Produktivitas : Inovatif dan Kreatif

Salah satu produk teknologi dalam penerapan induksi elektromagnetik adalah transformator. Inti besi kumparan dalam transformator dibuat berlapis-lapis terdiri atas lempengan-lempengan besi yang kemudian disatukan kembali setelah dilapisi bahan isolator, bukan merupakan besi utuh. Coba jelaskan secara singkat mengapa dibuat demikian!

Latihan Soal :

1. Sebuah transformator *step down* diperlukan untuk menurunkan tegangan dari 220 Volt menjadi 15 Volt. Jika banyaknya lilitan kumparan primernya 500 lilitan, tentukan berapa banyaknya lilitan sekundernya!
2. Perbandingan jumlah lilitan primer dan sekunder pada sebuah transformator adalah 20 : 3, dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar 220 Volt. Apabila pada kumparan primer mengalir arus 0,25 A dan efisiensi transformatornya 80 %, berapakah arus yang mengalir pada kumparan sekundernya?

Seputar Tokoh



Joseph Henry

Joseph Henry (1797 - 1878)

Pada tahun 1830 ilmuwan Amerika Joseph Henry menemukan bahwa perubahan dalam magnetisme dapat membuat arus mengalir. Namun, dia tidak dapat mempublikasikan penemuannya ini. Pada tahun 1832 dia menjelaskan "induktansi diri" sifat dasar induktor, yang sekarang biasa hanya disebut "induktansi". Dia juga banyak mengembangkan elektromagnet. Sebagai penghargaan, induktansi diukur dalam satuan Henry. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Induksi elektromagnetik yaitu peristiwa timbulnya ggl induksi pada ujung-ujung kumparan karena adanya perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan tersebut.
2. Fluks magnetik yaitu banyaknya jumlah garis gaya magnet yang menembus permukaan bidang tiap satu satuan luas secara tegak lurus.

   $\Phi = B\ A$ atau $\Phi = B\ A \cos\theta$
3. Hukum Faraday berbunyi: besarnya ggl induksi yang terjadi pada ujung-ujung kumparan berbading lurus dengan jumlah lilitan kawat pada kumparan dan kecepatan perubahan fluks magnetiknya.

   $$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}$$
4. Kecepatan perubahan fluks magnetik dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain :
   a. Perubahan luas penampang

      $\varepsilon = B\,\ell\,v \sin\theta$

   b. Perubahan induksi magnetiknya $\varepsilon = -NA\dfrac{dB}{dt}$

   c. Perubahan sudut antara garis normal dan arah induksi magnet. $E = BAN\,\omega \sin \omega t$
5. Hukum Lenz berbunyi: jika ggl induksi timbul pada suatu rangkaian, maka arah arus induksi yang dihasilkan sedemikian rupa menimbulkan medan magnet induksi yang menentang perubahan medan magnet.
6. Besarnya ggl induksi diri yang timbul pada ujung-ujung kumparan yang disebabkan adanya perubahan arus listrik di dalam kumparan dinyatakan :

   $$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

7. Energi yang tersimpan pada sebuah induktor yang dialiri arus listrik akan berupa energi medan magnet yang besarnya dinyatakan :

   $$W = \frac{1}{2} L I^2.$$

8. Besarnya induktansi diri sebuah kumparan dinyatakan :

   $$L = \frac{\mu N^2 A}{\ell}.$$

   Sebuah kumparan mempunyai induktansi diri sebesar 1 henry apabila pada kumparan tersebut timbul perubahan arus 1 ampere tiap detiknya, maka pada ujung-ujung kumparan timbul ggl sebesar 1 Volt.

9. Besarnya induktansi silang sepasang kumparan dapat dinyatakan :

   $$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 A}{\ell}.$$

   Sepasang kumparan mempunyai induktansi silang/timbal balik sebesar 1 henry apabila timbul perubahan kuat arus sebesar 1 ampere tiap detik pada kumparan yang pertama akan menimbulkan ggl sebesar 1 volt pada kumparan yang lainnya.

10. Pemanfaatan induksi elektromagnetik dalam bidang teknologi yaitu pada generator (dinamo), transformator, kumparan Rumhkorf dan bel listrik.

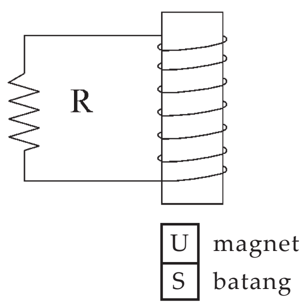
Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Gaya gerak listrik induksi dapat ditimbulkan dengan beberapa cara, antara lain ....
   A. meletakkan kumparan kawat dalam medan magnet
   B. menggerakkan kawat dalam medan magnet searah garis gaya magnet
   C. memasang galvanometer pada ujung-ujung kumparan
   D. meletakkan batang magnet dalam kumparan
   E. menggerakkan kawat dalam medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet

2. Pada gambar di bawah ini apabila ujung atas kutub magnet digerakkan menjauhi/mendekati kumparan, maka pada hambatan R akan timbul arus induksi berarah ....

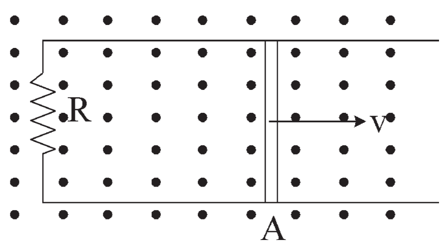


   A. ke atas, jika kutub utara magnet digerakkan mendekati kumparan
   B. ke bawah, jika kutub utara magnet digerakkan mendekati kumparan
   C. ke atas, jika kutub utara magnet digerakkan ke kanan
   D. ke bawah, jika magnet batang diputar searah jarum jam
   E. ke atas, jika magnet batang diputar berlawanan arah jarum jam

3. Apabila sepotong kawat horisontal digerakkan ke barat memotong tegak lurus medan magnet homogen yang arahnya ke bawah, maka pada awal gerakan dalam kawat timbul arus induksi dengan arah ....
   A. ke utara
   B. ke selatan
   C. ke timur
   D. ke barat
   E. ke atas

4. Kuat arus listrik dalam suatu rangkaian tiba-tiba turun dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 detik. Selama peristiwa itu terjadi timbul GGL induksi sebesar 32 V dalam rangkaian, induktansi rangkaian adalah .... (dalam henry)
   A. 0,32
   B. 0,40
   C. 2,5
   D. 32
   E. 40

5. Kawat AB panjang 30 cm digerakkan dalam medan magnet homogen B = 4 x 10^{-3} Tesla dengan kecepatan 25 ms^{-1}. Apabila hambatan seluruh rangkaian AB = 10 ohm, maka besar dan arah gaya Lorenz yang bekerja pada kawat AB adalah ....



   A. 3,6 x 10^{-6} N arah ke kanan
   B. 3,6 x 10^{-6} N arah ke kiri
   C. 3,0 x 10^{-6} N arah ke kanan
   D. 3,0 x 10^{-6} N arah ke kiri
   E. 1,8 x 10^{-6} N arah ke kanan

6. Sebuah kumparan terdiri atas 2000 lilitan berada dalam medan magnetik. Apabila dalam kumparan terjadi perubahan fluks magnetik dari 4 x 10^{-3} Weber menjadi 6 x 10^{-3} Weber dalam waktu 0,1 detik, maka besar GGL induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan adalah ....
   A. 20 Volt
   B. 30 Volt
   C. 40 Volt
   D. 50 Volt
   E. 60 Volt

7. Suatu transformator step down ideal mempunyai kumparan primer 1000 lilitan dan dihubungkan dengan tegangan 100 volt. Kumparan sekunder terdiri atas dua bagian terpisah masing-masing bertegangan Vs_1 dan Vs_2 = 2 volt. Jika pada kumparan s_1 mengalir arus 0,5 A maka pada s_2 mengalir arus sebesar ....
   A. 0,02 A
   B. 0,05 A
   C. 0,20 A
   D. 0,50 A
   E. 1,00 A

8. Suatu kumparan terdiri atas 200 lilitan berbentuk empat persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan ini bersumbu putar tegak lurus medan magnet sebesar 0,5 $Wb.m^{-2}$ dan diputar dengan kecepatan sudut 60 $rad.s^{-1}$. Pada ujung-ujung kumparan timbul ggl bolak-balik maksimum sebesar ....
   A. 30 V
   B. 60 V
   C. 110 V
   D. 220 V
   E. 300 V

9. Agar ggl yang dihasilkan oleh generator menjadi setengah dari mula-mula dapat dilakukan dengan cara ....
   A. periode putarannya dijadikan setengah kali semula
   B. kawat kumparan diganti dengan kawat lain yang tebalnya setengah kali semula
   C. frekuensi putarannya dijadikan setengah kali semula
   D. jumlah lilitannya dijadikan dua kali semula
   E. luas penampang lilitan dijadikan dua kali semula

10. Fluks magnet yang menembus tegak lurus kawat melingkar berubah dari 5 x 10^{-6} Wb menjadi nol dalam 3 detik, maka besarnya GGL induksi yang timbul adalah ....
A. 1,67 x 10^{-6} Volt
B. 1,76 x 10^{-6} Volt
C. 1,67 x 10^{-5} Volt
D. 1,76 x 10^{-5} Volt
E. 1,67 x 10^{-4} Volt

11. Sebuah batang tembaga panjang 30 cm terletak tegak lurus terhadap medan yang rapat fluksnya 0,8 Wb/m^2. Batang digerakkan dengan laju 0,5 m/s tegak lurus medan, Besar ggl yang terinduksi di dalam batang tersebut sebesar ....
A. 0,12 Volt
B. 0,19 Volt
C. 0,48 Volt
D. 1,33 Volt
E. 12 Volt

12. Sebuah traffo *step up* mengubah tegangan 25 Volt menjadi 250 volt. Jika efisiensi trafo 80% dan kumparan sekundernya dihubungkan dengan lampu 250 Volt 50 watt, maka kuat arus dalam kumparan primernya adalah ....
A. 0,5 A
B. 1,0 A
C. 1,5 A
D. 2,5 A
E. 5,8 A

13. Perbandingan jumlah lilitan kawat pada kumparan primer dan sekunder sebuah transformator adalah 1 : 4. Tegangan dan kuat arus masukannya masing-masing 10 V dan 2 A. Jika daya rata-rata yang berubah menjadi kalor pada transformator tersebut adalah 4 watt dan tegangan keluarannya 40 V, maka kuat arus keluarannya bernilai ....
A. 0,1 A
B. 0,4 A
C. 0,5 A
D. 0,6 A
E. 0,8 A

14. Sebuah toroida ideal, hampa, mempunyai 1.000 lilitan dan jari-jari rata-ratanya 0,5 m. Kumparan yang terdiri atas 5 lilitan dililitkan pada toroida tersebut. Penampang lintang toroida 2 x 10^{-3} m^2 dan arus listrik pada kawat toroida berubah dari 7A menjadi 9A dalam satu detik, maka di dalam kumparan timbul ggl imbas yang besarnya .... (dalam μV)
A. 4
B. 8
C. 12
D. 28
E. 36

15. Sebuah kumparan terdiri atas 1.000 lilitan dengan teras kayu berdiameter 4 cm. Kumparan tersebut memiliki hambatan 400 Ω dan dihubungkan seri dengan galvanometer yang hambatan dalamnya 200 Ω. Apabila medan magnet B = 0,015 tesla yang dililiti kumparan dengan garis medan sejajar batang kayu tiba-tiba dihilangkan, maka jumlah muatan listrik (dalam Coulomb) yang mengalir lewat galvanometer adalah ....
A. $\frac{1}{2}\pi \times 10^{-5}$
B. $\pi \times 10^{-5}$
C. $4\pi \times 10^{-5}$
D. 6p x 10^{-5}
E. $8\pi \times 10^{-5}$

B. Kerjakan soal di bawah ini!

1. Sebuah kumparan kawat dengan luas 50 cm^2 terletak dalam medan magnetik yang induksi magnetiknya 1,4 T. Jika garis normal bidang membentuk sudut 60^o terhadap arah induksi magnetik B. Tentukan besarnya fluks magnetik yang dilingkupi kumparan kawat tersebut!

2. Sebuah kumparan kawat dengan 100 lilitan, hambatan 4 ohm, dan luas penampang 20 cm^2 berada dalam medan magnet tegak lurus bidang dengan induksi magnet $B = 0,1t - 0,2t^2$ di mana B dalam Tesla dan t dalam sekon. Berapa kuat arus induksi yang mengalir saat t = 1 sekon?

3. Sebuah generator arus bolak-balik menghasilkan tegangan maksimum 1200 Volt diputar dengan periode 0,2 sekon. Jumlah lilitan kumparan dijadikan dua kali semula sedangkan luas penampang dan medan magnetnya tetap. Agar dapat menghasilkan tegangan maksimum yang sama besar, tentukan berapa rad/s kecepatan sudut kumparan harus diputar!
4. Sebuah solenoida terbuat dari kumparan kawat dengan 50 lilitan, panjang dan luas solenoida itu ialah 50 cm dan 10 cm^2. Tentukan besarnya energi yang tersimpan dalam solenoida bila dialiri arus sebesar arus 25 A!
5. Kumparan dengan 1000 lilitan mengitari pusat solenoida yang panjangnya 2 m, luas penampang 4 x 10^{-3} m^2 terdiri atas 20.000 lilitan. Solenoida dialiri arus 3 A. Bila arus dalam solenoida diputus dalam waktu sekon, hitunglah besar ggl induksi yang timbul pada kumparan!

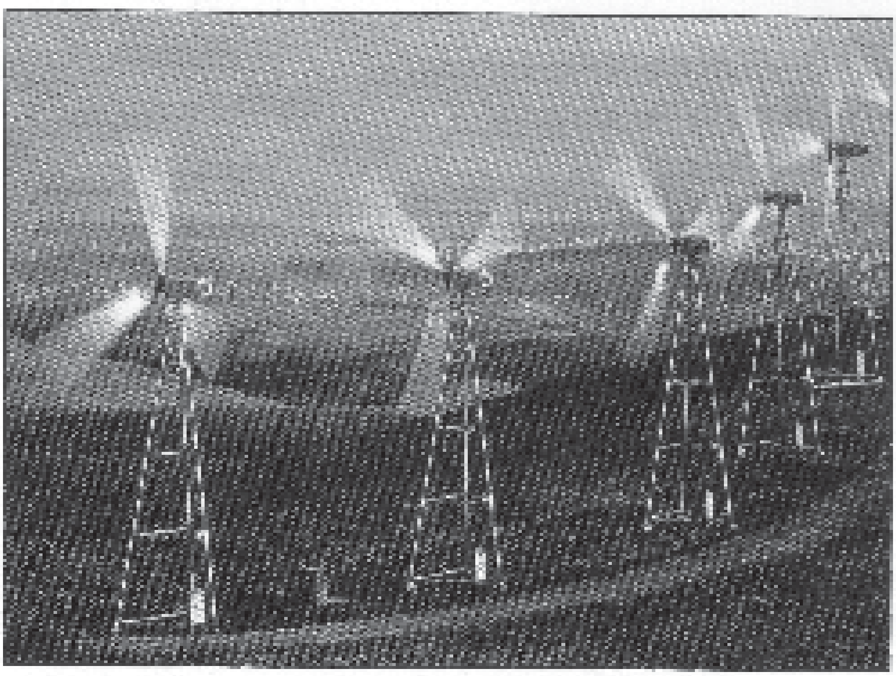
Refleksi

Setelah kalian mempelajari bab ini, diharapkan kalian dapat memahami tentang :

1. formulasi konsep induksi Faraday,
2. formulasi konsep induksi diri, dan
3. penerapan konsep ggl induksi dan ggl induksi diri pada generator dan transformator.

Apabila masih ada materi yang belum kalian pahami, pelajari kembali isi bab ini sebelum melanjutkan ke bab berikutnya!

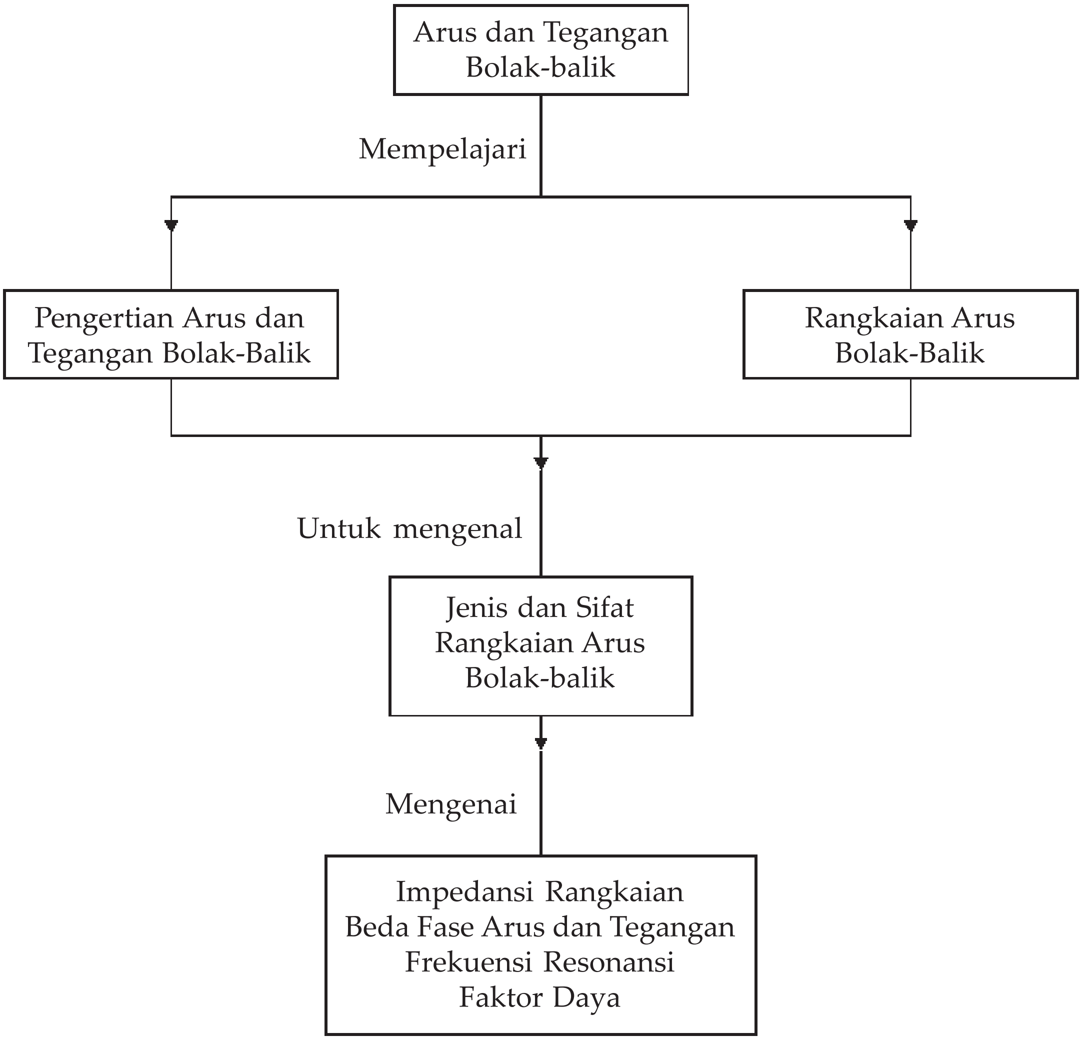
Bab VI
Arus dan Tegangan Bolak-Balik



Sumber : HDI Energi & Fisika

Ladang angin di California Utara di Amerika Serikat ini memiliki lusinan kincir angin yang mengubah energi dari angin menjadi energi listrik. Perputaran baling-baling digunakan untuk memutar generator listrik yang menghasilkan listrik bolak-balik. Tiap kincir angin ditempatkan sedemikian rupa sehingga kincir itu tidak akan menghambat daya angin penuh bagi kincir-kincir yang lain.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. memformulasikan rangkaian arus bolak-balik, dan
2. memformulasikan jenis dan sifat rangkaian arus bolak-balik.

Motivasi Belajar

Generator listrik merupakan sumber pembangkit listrik. Generator listrik dapat menghasilkan arus dan tegangan listrik searah dan bolak-balik. Pada bab ini pembahasan dibatasi pada arus dan tegangan listrik bolak-balik. Apa dan bagaimana arus dan tegangan listrik bolak-balik itu akan kita bahas secara mendalam pada bab ini, maka dari itu pelajarilah materi bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

arus bolak-balik, tegangan bolak-balik, oskiloskop, rangkaian hambatan, induktor, kapasitor, faktor daya

Pada bab 5 telah kalian pelajari tentang penerapan induksi magnet pada generator listrik sebagai sumber energi listrik. Pada bab ini kita akan mempelajari tentang arus dan tegangan yang dihasilkan oleh generator listrik. Generator listrik dibedakan menjadi 2 jenis, generator arus searah, yang menghasilkan arus dan tegangan listrik searah, dan generator bolak-balik yang menghasilkan arus dan tegangan bolak-balik. Pada umumnya semua tenaga listrik yang dihasilkan oleh generator merupakan listrik bolak-balik, hal ini yang menjadikan materi ini menarik untuk dipelajari.

A. Pengertian Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Dalam zaman modern sekarang ini kebutuhan akan energi listrik merupakan kebutuhan yang sangat pokok. Pada saat ini hampir semua perkantoran dan industri menggunakan energi listrik yang jumlahnya semakin lama semakin besar. Pemerintah pun berusaha untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dengan membangun pembangkit tenaga listrik. Dewasa ini telah banyak dibangun proyek-proyek untuk Pembangkit Tenaga Listrik Negara dengan berbagai sumber tenaga yang digunakan untuk menjalankannya, misalnya PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Disel), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas/Panas Bumi), PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), dan sebagainya.

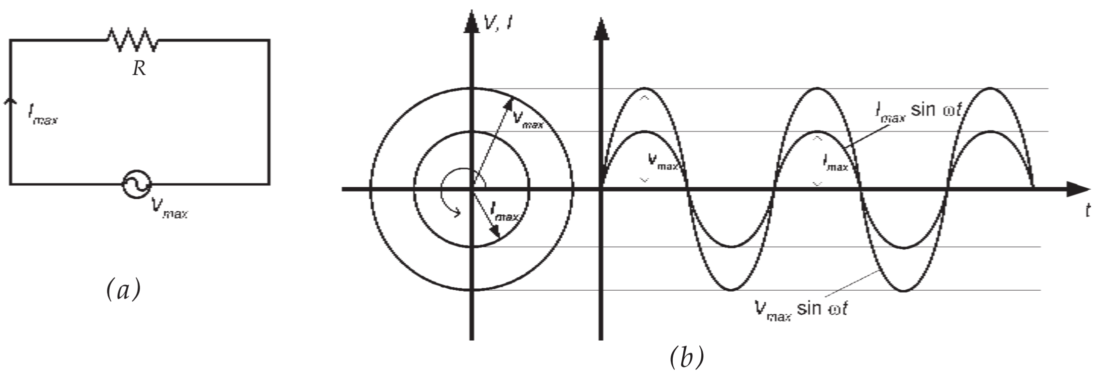
Pada umumnya semua tenaga listrik yang dihasilkan oleh berbagai sumber pembangkit tenaga listrik tersebut adalah berupa arus bolak-balik dan tegangan bolak-balik yang dihasilkan oleh generator yang digerakkan dengan energi yang berasal dari sumber daya alam.

Arus dan tegangan bolak-balik yaitu arus dan tegangan listrik yang arahnya selalu berubah-ubah secara kontinu/periodik. Seperti telah dijelaskan pada bab terdahulu dalam hukum Faraday bahwa adanya perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh kumparan akan menyebabkan timbulnya ggl induksi pada ujung-ujung kumparan dan jika antara ujung-ujung kumparan tersebut dihubungkan dengan sebuah kawat penghantar akan mengalir arus listrik melalui penghantar tersebut. Berdasarkan prinsip hukum Faraday inilah dibuat sebuah generator atau dinamo, yaitu suatu alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (energi gerak) menjadi energi listrik.

Tegangan listrik dan arus listrik yang dihasilkan generator berbentuk tegangan dan arus listrik *sinus soidal*, yang berarti besarnya nilai tegangan dan kuat arus listriknya sebagai fungsi sinus yang sering dinyatakan dalam *diagram fasor (fase vektor).* Diagram fasor adalah menyatakan suatu besaran yang nilainya berubah secara kontinu, fasor dinyatakan dengan suatu vektor yang nilainya tetap berputar berlawanan dengan putaran jarum jam. Apabila generator tersebut dihubungkan dengan suatu penghantar R dan menghasilkan tegangan maksimum sebesar V_{max}, maka tegangan dan arus listrik yang melewati penghantar tersebut dinyatakan :

$$V = V_{max} \sin \omega t \qquad \text{.... (6.1)}$$

$$I = I_{max} \sin \omega t \qquad \text{.... (6.2)}$$



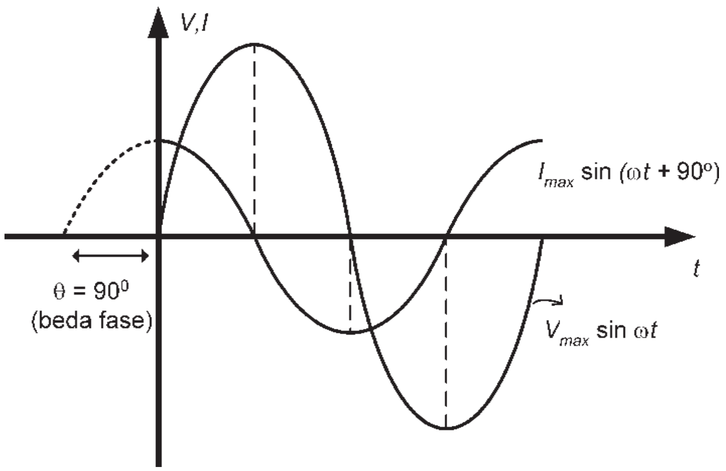
***Gambar 6.1** (a) Arus listrik melalui penghantar, (b) Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu.*

1. Pengertian Sudut Fase dan Beda Fase dalam Arus Bolak-Balik

Arus dan tegangan bolak-balik (AC) dapat dilukiskan sebagai gelombang sinussoidal, jika besarnya arus dan tegangan dinyatakan dalam persamaan :

$$V = V_{max} \sin \omega t \text{ dan } I = I_{max} \sin (\omega t + 90^o) \quad .... (6.3)$$

Di mana ωt atau ($\omega t + 90^o$) disebut *sudut fase* yang sering ditulis dengan lambang θ. Sedangkan besarnya selisih sudut fase antara kedua gelombang tersebut disebut *beda fase*. Berdasarkan persamaan antara tegangan dan kuat arus listrik tersebut dapat dikatakan bahwa antara tegangan dan kuat arus listrik terdapat beda fase sebesar 90° dan dikatakan arus mendahului tegangan dengan beda fase sebesar 90°. Apabila dilukiskan dalam diagram fasor dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 6.2 *Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu dengan beda fase 90°*

Contoh Soal

Dalam suatu rangkaian arus bolak-balik, persamaan antara arus dan tegangan dinyatakan dalam persamaan $I = I_{max} \sin \omega t$ dan $V = V_{max} \sin (\omega t - 45^o)$. Jelaskan apa artinya!

Penyelesaian :

Dalam rangkaian tersebut berlaku bahwa arus mendahului tegangan dengan beda fase 45°.

Soal Latihan :

Coba jelaskan secara singkat jika persamaan arus dan tegangan dinyatakan dalam persamaan :

1. $I = I_{max}$ sin $(\omega t + 60^o)$ dan $V = V_{max}$ sin ωt.
2. $I = I_{max}$ sin ωt dan $V = V_{max}$ sin $(\omega t + 45^o)$.
3. $I = I_{max}$ sin $(\omega t - 90^o)$ dan $V = V_{max}$ sin ωt.
4. $I = I_{max}$ sin ωt dan $V = V_{max}$ sin $(\omega t + 45^o)$.

2. Nilai Efektif Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Nilai tegangan dan arus bolak-balik selalu berubah secara periodik sehingga menyebabkan, kesulitan dalam mengadakan pengukurannya secara langsung. Oleh karena itu, untuk mengukur besarnya tegangan dan kuat arus listrik bolak balik (AC = *Alternating Current*) digunakan *nilai efektif*. Yang dimaksud dengan nilai efektif arus dan tegangan bolak balik yaitu nilai arus dan tegangan bolak-balik yang setara dengan arus searah yang dalam waktu yang sama jika mengalir dalam hambatan yang sama akan menghasilkan kalor yang sama. Semua alat-alat ukur listrik arus bolak-balik menunjukkan nilai efektifnya. Hubungan antara nilai efektif dan nilai maksimum dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$V = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ V_{max} \quad \text{dan} \quad I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ I_{max} \qquad .... (6.4)$$

di mana :

V = tegangan efektif

I = kuat arus efektif

V_{max} = tegangan maksimum

I_{max} = Kuat arus maksimum

Contoh Soal

Dalam suatu hasil pembacaan ampermeter dan voltmeter masing-masing menunjukkan nilai 2 A dan 220 V. Tentukan berapa nilai kuat arus maksimum dan tegangan maksimumnya!

Penyelesaian :

$I_{max} = I\sqrt{2} = 2 \times 1{,}41 = 2{,}82$ A

$V_{max} = V\sqrt{2} = 220 \times 1{,}41 = 250{,}2$ Volt

3. Nilai Rata-Rata Arus Bolak-Balik

Nilai rata-rata arus bolak-balik yaitu nilai arus bolak-balik yang setara dengan arus searah untuk memindahkan sejumlah muatan listrik yang sama dalam waktu yang sama pada sebuah penghantar yang sama. Hubungan antara nilai arus dan tegangan arus bolak-balik dengan nilai arus dan tegangan maksimumnya dinyatakan dalam persamaan :

$$I_r = \frac{2I_{max}}{\pi} \qquad \text{.... (6.5)}$$

di mana :

V_r = tegangan rata-rata

I_r = kuat arus rata-rata

V_{max} = tegangan maksimum

I_{max} = kuat arus maksimum

Contoh Soal

Sebuah hambatan sebesar 50 Ω dihubungkan dengan sumber tegangan AC yang memenuhi persamaan V = 200 sin 200t, tentukan besarnya arus rata-rata yang mengalir pada hambatan tersebut!

Penyelesaian :

Dari persamaan tegangan diketahui bahwa

V_{max} = 200 Volt, maka :

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A}$$

Maka

$$I_r = \frac{2 \times I_{max}}{\pi} = \frac{2 \times 4}{3{,}14} = \frac{8}{3{,}14} = 2{,}55 \text{ A}$$

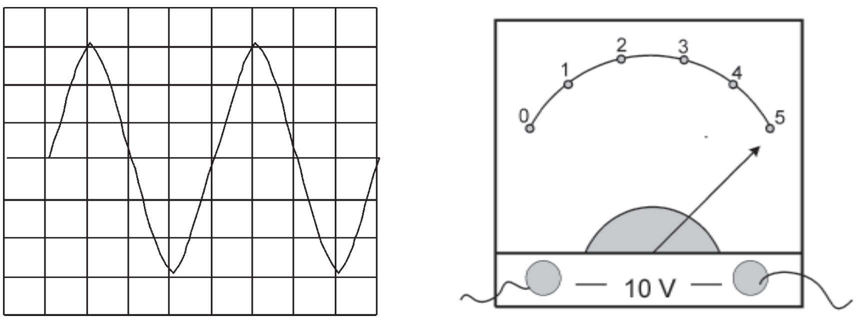
Jadi, arus rata-rata yang mengalir adalah 2,55 A.

4. Alat Ukur Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Pada dasarnya alat ukur lisrik arus bolak-balik tidak menunjukkan nilai yang sesungguhnya, melainkan nilai efektifnya. Misalkan pada alat ukur amperemeter AC dan voltmeter AC, dari hasil pembacaan pada skala alat tersebut

bukan merupakan nilai yang sesungguhnya, akan tetapi merupakan nilai efektifnya. Sedangkan untuk melihat nilai yang sesungguhnya, misalkan nilai maksimumnya atau untuk mengetahui tegangan puncak ke puncak yang sering disebut Vp-p dapat digunakan alat ukur yang disebut dengan CRO yaitu singkatan dari *Cathoda Rays Osciloskop*.

Pada layar CRO dapat terlihat bentuk grafik dari arus atau tegangan bolak-balik terhadap waktu. Pada prinsipnya pada sebuah CRO terdapat tombol pengatur vertikal (penguat tegangan) yang sering disebut *Volt/Dive* dan tombol pengatur horisontal yang sering disebut *sweeptime* yang menyatakan lamanya waktu sapuan ke arah horisontal. Misalkan tombol Volt/Dive menunjuk pada angka 1 Volt yang artinya tinggi 1 kotak dalam layar CRO tersebut menyatakan besarnya tegangan 1 Volt sedangkan jika tombol sweeptime menunjuk pada angka 20 ms yang berarti untuk menempuh satu kotak horisontal pada layar oskiloskop membutuhkan waktu 20 mili sekon. Misalkan sebuah tegangan sinusoidal arus bolak-balik pada layar oskiloskop terlihat bahwa 1 gelombang menempati 4 kotak ke arah horisontal dan 6 kotak ke arah vertikal (Perhatikan **Gambar 6.3 (a)** di bawah ini).



(a) *(b)*

***Gambar 6.3** (a) Tampilan pada layar osiloskop, (b) Pengukur arus dan tegangan.*

Apabila tombol pengatur vertikal menunjuk pada angka 2 Volt dan pengatur horisontal menunjuk angka 5 ms. Dapat diperoleh hasil pembacaan sebagai berikut.

V_{max} = 3 x 2 Volt = 6 Volt

$V_{P\text{-}P}$ = 6 x 2 Volt = 12 Volt

Periode = T = 4 x 5 ms = 20 ms = 2.10^{-2} s

$$\text{Frekuensi} = f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2.10^{-2}} = 50 \text{ Hz}$$

Sedangkan hasil pembacaan pada alat ukur arus atau tegangan bolak-balik dapat dinyatakan :

$$HP = \frac{skala\ yang\ ditunjuk}{skala\ -\ maksimum} \times BU \qquad \text{.... (6.6)}$$

di mana :

HP = hasil pembacaan alat ukur

BU = Batas ukur yang digunakan

Contoh : **(lihat Gambar 6.3 (b))**, dari skala yang terbaca alat ukur, kita dapat mencari nilai HP sebagai berikut :

$$HP = \frac{5}{5} \times 10 \text{ Volt } = 10 \text{ Volt}$$

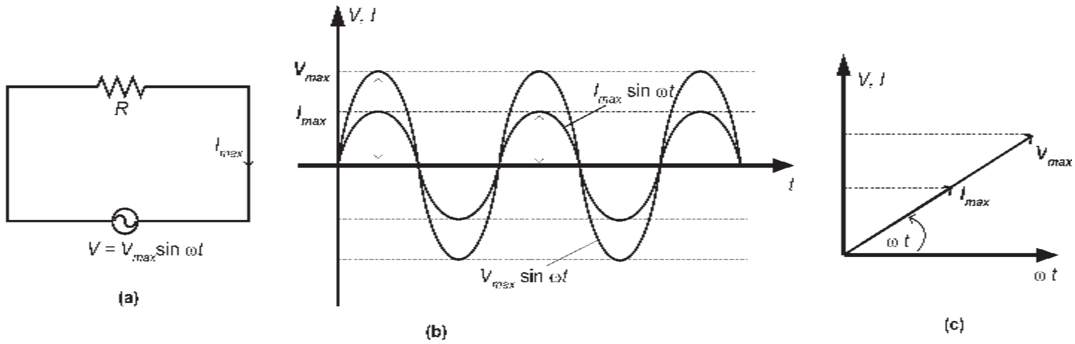
Wawasan Produktivitas : Inovatif dan Kreatif

Pada umumnya pemerintah hanya menyediakan tenaga listrik secara besar-besaran dalam bentuk energi listrik arus bolak-balik (AC). Sedangkan untuk menjalankan peralatan elektronika seperti halnya radio, tape, komputer pada umumnya menggunakan tenaga listrik arus searah. Di pasaran, toko-toko elektronik telah banyak dijual perangkat alat listrik yang digunakan untuk mengubah arus listrik bolak-balik (AC) menjadi arus listrik searah (DC) yang disebut adaptor/power supply. Cobalah kamu buat skema rangkaian sebuah adaptor sederhana dan sebutkan pula fungsi komponen-komponen yang terdapat di dalam adaptor tersebut!

B. Rangkaian Arus Bolak-Balik

1. Rangkaian Hambatan pada Arus Bolak-Balik

Rangkaian hambatan/resistor dalam arus bolak-balik (AC) berfungsi sebagai pembatas arus listrik yang masuk atau menurunkan potensial listrik dalam rangkaian sehingga antara arus dan tegangan pada hambatan tersebut dengan arus dan tegangan pada sumber tidak mengalami perubahan fase, yang artinya arus dan tegangan pada hambatan/resistor adalah sefase, yang dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 6.4 *(a) Rangkaian resistor dengan sumber tegangan AC, (b) Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu, (c) Diagram fasor rangkaian resistor murni.*

Besarnya kuat arus yang melalui hambatan dapat dinyatakan dari hukum Ohm yaitu :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_{max} \sin \omega t}{R} = \frac{V_{max}}{R} \sin \omega t$$

Jika $\frac{V_{max}}{R} = I_{max}$ maka $I = I_{max} \sin \omega t$ .... *(6.7)*

Contoh Soal

Suatu hambatan sebesar 5 Ω dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar V= 20 sin ωt.

Tentukan :

a. kuat arus maksimum yang melalui hambatan,

b. kuat arus efektif yang melalui hambatan!

Penyelesaian :

Dari persamaan tegangan diketahui bahwa

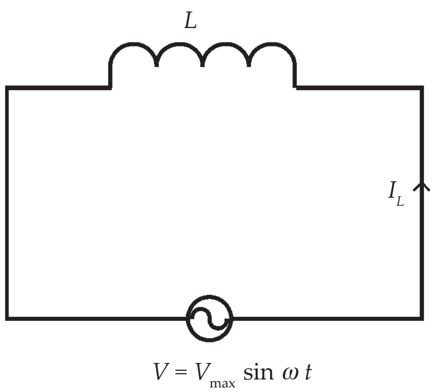
V_{max} = 20 Volt sehingga :

a. $I_{max} = \frac{V_{max}}{R} = 4$ A

b. $I_{ef} = 0{,}707\ I_{max} = 0{,}707 \times 4 = 2{,}828$ A

2. Rangkaian Induktor dalam Rangkaian Arus AC

Perhatikan gambar rangkaian induktor yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC. Besarnya tegangan pada ujung-ujung induktor sama dengan tegangan sumber, sehingga berlaku :



Gambar 6.5 *Rangkaian induktor dengan sumber tegangan AC.*

$$V_L = V = V_{max} \sin \omega t$$

$$L\frac{dI_L}{dt} = V_{max} \sin \omega t \text{ atau}$$

$$dI_L = \frac{V_{max}}{L} \sin \omega t\, dt$$

$$I_L = \int dI_L = \int \frac{V_{max}}{L} \sin \omega t\, dt$$

$$I_L = -\frac{V_{max}}{\omega L} \cos \omega t$$

di mana $\cos \omega t = -\sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$

$$I_L = \frac{V_{max}}{\omega L} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad \text{.... (6.8)}$$

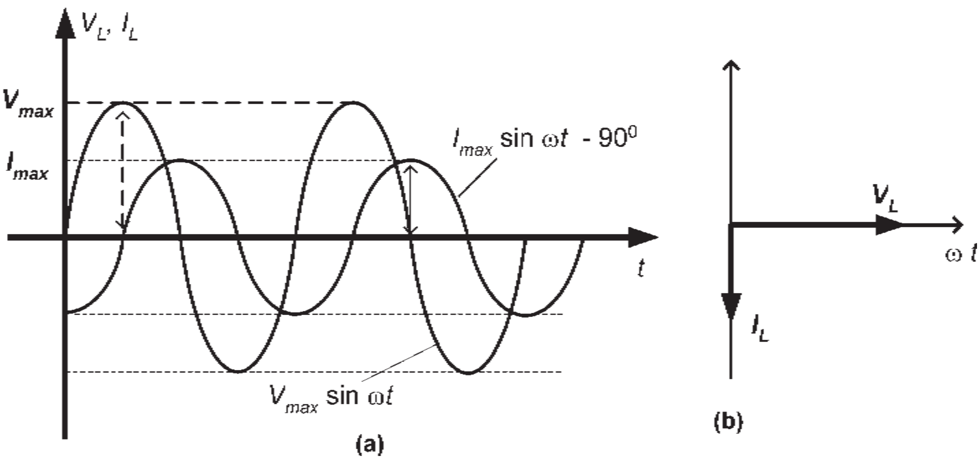
jika $\sin (\omega t - \frac{\pi}{2}) = \pm 1$ maka $\frac{V_{max}}{\omega L} = I_{max}$

$I_L = I_{max} \sin (\omega t - \frac{\pi}{2})$ atau

$$I_L = I_{max} \sin (\omega t - 90^o) \quad \text{.... (6.9)}$$

Apabila kita lihat antara persamaan I_L (kuat arus dalam induktor) dengan V (tegangan sumber) terlihat bahwa *arus listrik dengan tegangan listrik terjadi selisih sudut fase sebesar* 90^o *atau* $\frac{\pi}{2}$ *di mana kuat arus ketinggalan terhadap tegangan dengan selisih sudut fase* 90^o.

Perbedaan fase antara kuat arus dan tegangan pada induktor dapat digambarkan dengan diagram fasor sebagai berikut :



Gambar 6.6 *(a) Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu, (b) Diagram fasor rangkaian induktor murni.*

Apabila kita perhatikan persamaan $\frac{V_{max}}{\omega L} = I_{max}$ identik dengan $I = \frac{V}{R}$ pada hukum Ohm, di mana ωL merupakan suatu hambatan yang disebut dengan reaktansi induktif yang diberi lambang X_L yang besarnya dinyatakan :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \qquad \text{.... (6.10)}$$

di mana :

X_L = reaktansi induktif (Ohm = Ω)

L = induktansi diri induktor (Henry = H)

ω = frekuensi anguler/sudut (rad/s)

f = frekuensi linier (Hertz = Hz)

Dalam rangkaian induktor jika I menyatakan kuat arus yang mengalir pada induktor, X_L menyatakan reaktansi induktif, V_{max} menyatakan tegangan maksimum, dan V_{ef} menyatakan tegangan efektif tegangan sumber arus AC berlaku hubungan :

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{X_L} \text{ atau } X_L = \frac{V_{max}}{I_{max}} \qquad \text{.... (6.11)}$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_L} \text{ atau } X_L = \frac{V_{ef}}{I_{ef}} \qquad \text{.... (6.12)}$$

Contoh Soal

Sebuah induktor mempunyai induktansi 0,05 H dihubungkan dengan sumber tegangan AC yang mempunyai tegangan $V = 20 \sin 120\ \pi t$.

Hitunglah :

a. reaktansi induktif,

b. kuat arus maksimum yang mengalir pada induktor!

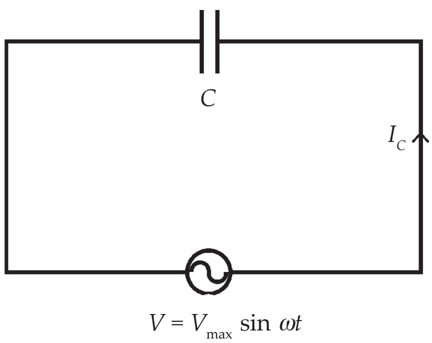
Penyelesaian :

Dari persamaan tegangan diperoleh bahwa V_{max} = 20 Volt dan f = 60 Hz ($120\ \pi = 2\ \pi f$) sehingga dapat dicari :

a. $X_L = \omega L = 2\ \pi f L = 2 \times 3{,}14 \times 60 \times 0{,}05 = 6{,}28 \times 3 = 18{,}84\ \Omega$

b. $I_{max} = \dfrac{V_{max}}{X_L} = \dfrac{20}{18{,}84} = 1{,}06$ A

3. Rangkaian Kapasitor dalam Arus AC



Gambar 6.7 *Rangkaian kapasitor dengan sumber tegangan AC.*

Dalam suatu rangkaian arus AC yang terdiri atas kapasitor mempunyai sifat *bahwa antara tegangan dan arus memiliki beda fase, di mana arus mendahului tegangan dengan beda sudut fase sebesar 90º atau* $\frac{\pi}{2}$. Besarnya kuat arus listrik yang mengalir dalam kapasitor dapat dinyatakan dengan laju perpindahan muatan listrik pada keping kapasitor tersebut yang dinyatakan :

$I = \dfrac{dq}{dt}$ di mana $q = CV$, sehingga

$$I = \frac{dCV_{max} \sin \omega t}{dt} = CV_{max} \frac{d \sin \omega t}{dt} = \cos \omega t = CV_{max} \cos \omega t$$

Di mana $\cos \omega t = \sin (\omega t + 90^o) = \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$

Maka $I = wC\ V_{max} \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}) = \dfrac{V_{max}}{\frac{1}{\omega c}} \sin (\omega t + \frac{\pi}{2})$

Jika sin $(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \pm 1$ maka $I_{max} = \frac{V_{max}}{\frac{1}{\omega c}}$. Hal ini identik dengan hukum Ohm bahwa $I = \frac{V}{R}$. Di mana $\frac{1}{\omega C}$ identik dengan sebuah hambatan yang disebut dengan reaktansi kapasitif yang dilambangkan X_C yang besarnya dinyatakan :

$$X_C = \frac{1}{\omega t} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad \text{.... (6.13)}$$

di mana :

X_C = reaktansi induktif (Ohm = Ω)

C = kapasitas kapasitor (Farad = F)

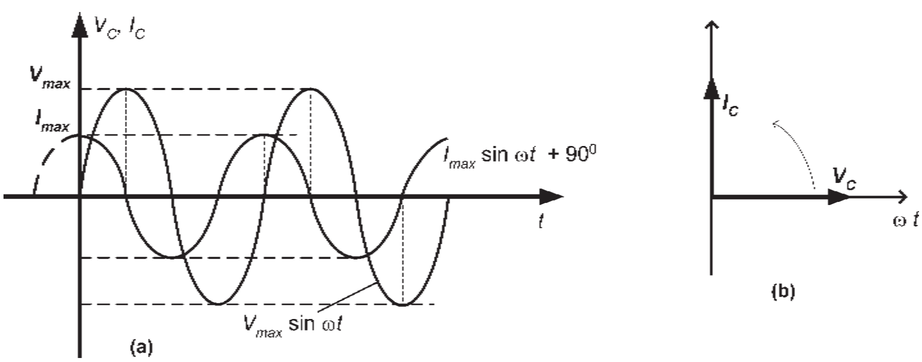
ω = frekuensi anguler/sudut (rad/s)

f = frekuensi linier (Hertz = Hz)

Dalam rangkaian kapasitor pada arus AC mempunyai sifat bahwa arus mendahului tegangan dengan beda sudut fase sebesar 90° atau $\frac{\pi}{2}$ dan berlaku hubungan :

$$I_{max} = \frac{V_{max}}{X_C} \text{ atau } X_C = \frac{V_{max}}{I_{max}} \qquad \text{.... (6.14)}$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{X_C} \text{ atau } X_C = \frac{V_{ef}}{I_{ef}} \qquad \text{.... (6.15)}$$



Gambar 6.8 *(a) Grafik arus dan tegangan sebagai fungsi waktu, (b) Diagram fasor rangkaian kapasitor murni*

Contoh Soal

1. Suatu hambatan murni sebesar 50 W dihubungkan dengan suatu sumber tegangan AC. Ternyata ampermeter yang terpasang pada rangkaian tersebut menunjukkan 2 A. Tentukan besarnya tegangan dan kuat arus maksimum dari sumber tegangan tersebut!

   Penyelesaian :

   Hasil pengukuran ampermeter menunjukkan nilai arus efektifnya sehingga :

   $I_{max} = I_{ef}\sqrt{2} = 2\sqrt{2}$ = 2 x 1,41 = 2,82 A

   $V_{max} = I_{max}\ R$ = 2,82 x 50 Volt = 141 Volt

2. Suatu induktor mempunyai induktansi diri 0,05 Henry dihubungkan dengan sumber tegangan AC bertegangan V = 100 sin 200t. Tentukan besarnya reaktansi induktif kuat arus listrik maksimum yang melalui induktor tersebut!

   Penyelesaian :

   Persamaan umum tegangan adalah :

   $V = V_{max} \sin \omega t = 100 \sin 200t$

   Dari persamaan tersebut diketahui bahwa V_{max} = 100 Volt dan ω = 200 rad/s.

   Jadi $X_L = \omega L$ = 200 x 0,05 = 10 Ω

   $$I_{max} = \frac{V_{max}}{X_L} = \frac{100}{10} = 10 \text{ Ampere}$$

3. Suatu kapasitor yang mempunyai kapasitas 20 μF dipasang pada sumber tegangan AC bertegangan V = 100 sin 200t. Tentukan berapa reaktansi kapasitif dan kuat arus yang melalui kapasitor tersebut!

   Penyelesaian :

   Persamaan umum tegangan adalah :

   $V = V_{max} \sin \omega t = 100 \sin 200t$

   Dari persamaan tersebut diketahui bahwa V_{max} = 100 Volt dan ω = 200 rad/s.

   $$\text{Jadi } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{200 \times 20 \times 10^{-6}}$$

   $$= \frac{1}{4 \times 10^{-3}} = \frac{1000}{4} = 250\ \Omega$$

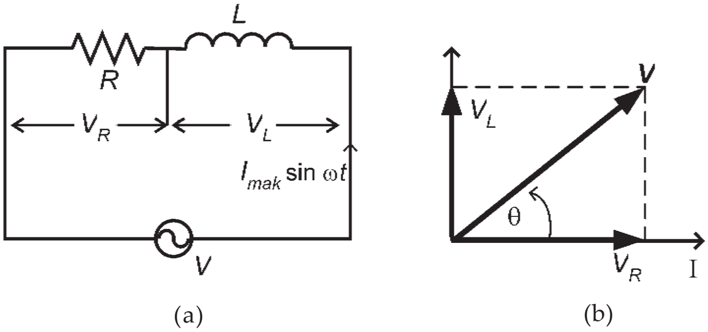
   $$I_{max} = \frac{V_{max}}{X_C} = \frac{100}{250} = 0{,}4 \text{ Ampere}$$

Soal Latihan :

1. Suatu hambatan sebesar 40 Ω dipasang pada sumber tegangan AC, apabila ampermeter yang terpasang pada rangkaian tersebut menunjukkan hasil pembacaan 5 ampere, tentukan berapa besar tegangan efektif dan tegangan maksimum dari sumber tegangan tersebut!
2. Suatu induktor jika dipasang pada tegangan arus searah sebesar 80 volt, pada induktor tersebut mengalir arus sebesar 2 ampere. Jika induktor tersebut dipasang pada sumber tegangan AC, dalam induktor akan mengalir arus sebesar 2 ampere. Apabila tegangan sumbernya sebesar 100 Volt, tentukan :
   a. reaktansi induktifnya,
   b. sudut pergeseran anta arus dan tegangan!
3. Suatu induktor yang mempunyai induktansi 0,05 H dipasang pada sumber tegangan AC sebesar V = 100 sin 200t, tentukan besarnya reaktansi induktif dan kuat arus yang mengalir dalam induktor tersebut!
4. Sebuah kapasitor yang memiliki kapasitas sebesar 50 μF dipasang pada tegangan sebesar V = 100 sin 200t, tentukan besarnya reaktansi kapasitif dan kuat arus yang mengalir pada kapasitor tersebut!

4. Rangkaian Seri RL

Gambar di bawah ini menggambarkan sebuah rangkaian seri hambatan dan induktor yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar V, yang disebut rangkaian seri *RL*.



Gambar 6.9 *(a) Rangkaian seri RL, (b) Diagram fasor arus dan tegangan pada rangkaian seri RL*

Jika V_R menyatakan tegangan pada ujung-ujung hambatan (R), V_L menyatakan tegangan pada ujung-ujung induktor, maka dalam rangkaian ini nilai V_R sefase dengan arus listrik, sedangkan V_L mendahului arus sebesar 90°. Sehingga besarnya tegangan V dapat dicari dengan menjumlahkan nilai V_R dan V_L secara vektor (fasor) yaitu :

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2} \quad .... (6.16)$$

Sedangkan :

$V_R = I\,R$

$V_L = I\,I_L$

Maka

$V = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_L^2}$

$$V = I\sqrt{R^2 + {X_L}^2} \quad .... (6.17)$$

Sesuai dengan hukum Ohm bahwa $V = I.R$ bahwa nilai $\sqrt{R^2 + {X_L}^2}$ merupakan suatu jenis hambatan dalam rangkaian AC yang disebut *impedansi*, dilambangkan Z dan ditulis:

$$Z = \sqrt{R^2 + {X_L}^2} \quad .... (6.18)$$

Besarnya pergeseran fase antara arus dan tegangan dinyatakan:

$$tg\ \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R} \quad .... (6.19)$$

Besarnya sudut pergeseran antara arus dan tegangan pada rangkaian seri RL tidak lagi sebesar 90°, melainkan kurang dari 90°, di mana tegangan mendahului arus.

Contoh Soal

1. Sebuah induktor yang mempunyai induktansi sebesar 0,05 H dihubungkan seri dengan hambatan 30 Ω, kemudian dipasang pada tegangan AC sebesar V = 100 sin 800 t. Tentukan berapa besarnya :
   a. reaktansi induktifnya,
   b. impedansi rangkaian,
   c. kuat arus maksimumnya,

d. beda fase antara arus dan tegangan, dan
e. persamaan arus sesaatnya!

Penyelesaian :

Dari persamaan tegangan $V = V_{max} \sin \omega t$ dapat diperoleh bahwa V_{max} = 100 *volt* dan ω = 800 *rad/s* maka dapat dicari :

a. $X_L = \omega L = 800 \times 0{,}05 = 40\ \Omega$

b. $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(30)^2 + (40)^2}$

$= \sqrt{900 + 1600} = \sqrt{2500} = 50\ \Omega$

c. $I_{\max} = \dfrac{V_{\max}}{Z} = \dfrac{100}{50} = 2\ \text{A}$

d. $\text{tg}\ \theta = \dfrac{X_L}{R} = \dfrac{40}{30} = 1\dfrac{1}{3} = 1$ atau

$\theta = arc\ \text{tg}\ 1\dfrac{1}{3} = 53^{\circ}$

e. $I = I_{\max} \sin (\omega t - \theta) = 2 \sin (\omega t - 53^{\circ})$

2. Sebuah induktor bila diukur menggunakan ohm meter memiliki hambatan 40 Ω dan jika dipasang pada arus bolak balik akan mengalir arus sebesar 2 A jika tegangannya 100 Volt. Tentukan berapa Ω reaktansi induktifnya!

Penyelesaian :

Diketahui : $R = 40\ \Omega$

$I = 2\ \text{A}$

$V = 100$ Volt

Ditanyakan : $X_L = ...?$

Jawab : $Z = \dfrac{V}{I} = \dfrac{100}{2} = 50\ \Omega$

$Z^2 = R^2 + X_L^2$

$XL = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{(50)^2 - (40)^2}$

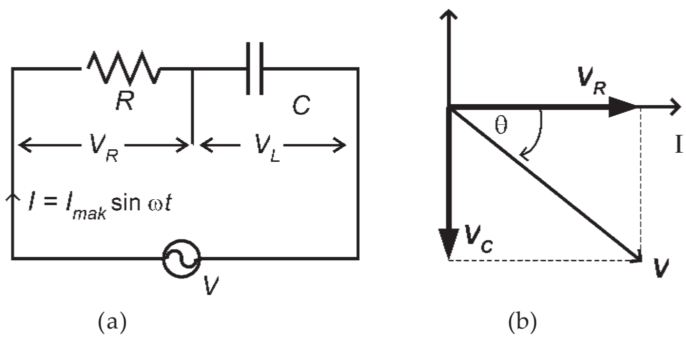
$= \sqrt{2500 - 1600} = \sqrt{900} = 30\ \Omega$

Soal Latihan :

1. Sebuah induktor mempunyai reaktansi induktif sebesar 80 Ω dihubungkan seri dengan hambatan sebesar 60 Ω. Apabila susunan tersebut dihubungkan dengan tegangan AC sebesar 220 Volt hitunglah :
   a. impedansi rangkaian tersebut, dan
   b. kuat arus yang mengalir dalam rangkaian tersebut!
2. Sebuah induktor yang memiliki induktansi 200 mH disusun seri dengan hambatan sebesar 40 Ω , kemudian susunan itu dipasang pada tegangan 100 Volt. Bila frekuensi sumber tegangan sebesar 50 Hz, tentukan kuat arus yang mengalir pada rangkaian tersebut!

5. Rangkaian Seri RC

Gambar di bawah ini menggambarkan sebuah rangkaian seri hambatan dan kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar *V*, yang disebut *rangkaian seri RC*.



Gambar 6.10 *(a) Rangkaian seri RC, (b) Diagram fasor arus dan tegangan pada rangkaian seri RC.*

Apabila V_R menyatakan tegangan pada ujung-ujung hambatan *(R)*, V_C menyatakan tegangan pada ujung-ujung induktor, maka dalam rangkaian ini nilai V_R sefase dengan arus listrik, sedangkan V_C tertinggal arus sebesar 90°. Sehingga besarnya tegangan V dapat dicari dengan menjumlahkan nilai V_R dan V_C secara vektor (fasor) yaitu :

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \qquad \text{.... (6.20)}$$

Sedangkan :

$V_R = I\,R$

$V_L = I\,X_C$

Maka :

$V = \sqrt{I^2 R^2 + I^2 X_C^2}$

$$V = I\sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad \text{.... (6.21)}$$

Sesuai dengan hukum Ohm $V = I.R$ bahwa nilai $\sqrt{R^2 + X_C^2}$ merupakan suatu jenis hambatan dalam rangkaian AC yang disebut *impedansi*, dilambangkan Z dan ditulis:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \qquad \text{.... (6.22)}$$

Besarnya pergeseran fase antara arus dan tegangan dinyatakan:

$$\text{tg}\ \theta = \frac{V_C}{V_R} = \frac{X_C}{R} \qquad \text{.... (6.23)}$$

Besarnya sudut pergeseran antara arus dan tegangan pada rangkaian seri RC tidak lagi sebesar 90º, melainkan kurang dari 90º di mana tegangan tertinggal terhadap arus.

Contoh Soal

1. Sebuah kapasitor dengan kapasitas 5 μF disusun seri dengan hambatan sebesar 300 Ω dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar V = 200 sin 500t . Tentukan besarnya :
   a. reaktansi kapasitif,
   b. impedansi rangkaian,
   c. kuat arus maksimum,
   d. beda fase antara arus dan tegangan, dan
   e. tuliskan bentuk persamaan arus sesaatnya!

   Penyelesaian :

   Dari persamaan tegangan $V = V_{max} \sin \omega t$ diketahui bahwa V_{max} = 200 volt dan ω = 500 rad/s, maka dapat dicari :

a. $X_C = \dfrac{1}{\omega C}$

$= \dfrac{1}{5 \times 10^2 \times 5 \times 10^{-6}} = \dfrac{1}{25 \times 10^{-4}} = \dfrac{10^4}{25}$

$= \dfrac{10000}{25} = 400\ \Omega$

b. $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(300)^2 + (400)^2}$

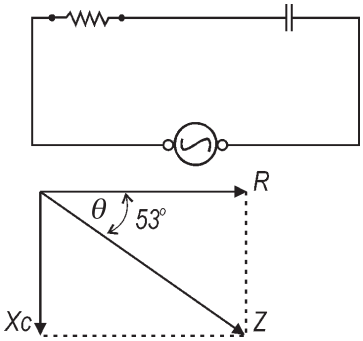
$= \sqrt{90000 + 160000} = \sqrt{250000} = 500\ \Omega$

c. $I_{max} = \dfrac{V_{max}}{Z} = \dfrac{200}{500} = 0{,}4\ \text{A}$

d. $tg\ \theta = \dfrac{X_C}{R} = \dfrac{400}{300} = \dfrac{4}{3} = 1{,}333$ atau

$\theta = arc\ \text{tg}\ 1{,}333 = 53^o$

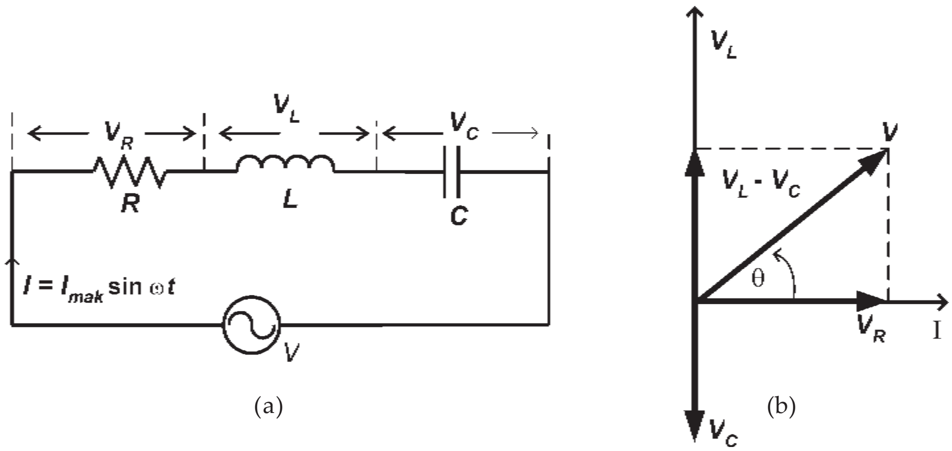
e. $I = I_{max} \sin(\omega t + \theta) = 0{,}4 \sin(\omega t + 53^o)$



Soal Latihan :

1. Sebuah kapasitor yang kapasitasnya 50 μF disusun seri dengan hambatan 40 Ω. Susunan ini dipasang pada tegangan AC sebesar 200 Volt. Tentukan besarnya kuat arus yang mengalir dalam rangkaian apabila :
   a. sumber tegangan memiliki frekuensi anguler 800 rad/s, dan
   b. sumber tegangan memiliki frekuensi linier sebesar 50 Hz!
2. Kapasitor memiliki kapasitas sebesar 500 μF disusun seri dengan hambatan sebesar 20 Ω, dipasang pada sumber tegangan yang memiliki frekuensi linier sebesar 50 Hz. Hitunglah :
   a. reaktansi kapasitifnya,
   b. impedansi rangkaian, dan
   c. kuat arus listrik yang mengalir pada rangkaian!

6. Rangkaian Seri RLC



Gambar 6.11 *(a) Rangkaian seri RLC, (b) Diagram fasor arus dan tegangan pada rangkaian seri RLC*

Rangkaian seri RLC yaitu rangkaian yang terdiri atas hambatan, induktor dan kapasitor yang dihubungkan seri, kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan AC. Telah diterangkan bahwa pada rangkaian hambatan arus tegangan sefase, sedangkan pada induktor tegangan mendahului arus, dan pada kapasitor arus mendahului tegangan. Besarnya tegangan jepit pada rangkaian seri RLC dapat dicari dengan menggunakan diagram fasor sebagai berikut :

$V_R = I_{max} R \sin \omega t = V_{max} \sin \omega t$

$V_L = I_{max} X_L \sin (\omega t + 90^o) = V_{max} \sin (\omega t + 90^o)$

$V_C = I_{max} X_C \sin (\omega t - 90^o) = V_{max} \sin (\omega t - 90^o)$

Jika sudut ωt kita pilih sebagai sumbu x, maka diagram fasor untuk I, V_R, V_L, dan V_C dapat digambarkan dengan **Gambar (6.11)**. Dan besarnya tegangan jepit pada rangkaian seri RLC dapat dicari dengan menjumlahkan fasor dari V_R, V_L, dan V_C menjadi :

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \qquad \text{.... (6.24)}$$

di mana :

V = tegangan total/jepit susunan RLC (volt)

V_R = tegangan pada hambatan (volt)

V_L = tegangan pada induktor (volt)

V_C = tegangan pada kapasitor (volt)

Dari gambar diagram fasor terlihat bahwa *antara tegangan dan arus terdapat beda sudut fase sebesar* θ yang dapat dinyatakan dengan :

$$\text{tg } \theta = \frac{(V_L - V_C)}{V_R} \qquad \text{.... (6.26)}$$

Besarnya arus yang melewati rangkaian RLC adalah sama, sehingga besarnya tegangan pada masing masing komponen R, L, dan C dapat dinyatakan : $V_R = I\,R$, $V_L = I\,X_L$ dan $V_C = I\,X_C$

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

$$V = \sqrt{I^2 R^2 + (I^2 X_L^2 - I^2 X_C^2)}$$

$$V = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\frac{V}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Berdasarkan hukum Ohm bahwa $\frac{V}{I} = R$, akan tetapi dalam rangkaian arus AC besaran $\frac{V}{I} = Z$ yang disebut dengan *impedansi rangkaian RLC* yang disusun seri dinyatakan :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \text{.... (6.27)}$$

di mana :

Z = impedansi rangkaian seri RLC (Ω)

R = hambatan (Ω)

X_L = reaktansi induktif (Ω)

X_C = reaktansi kapasitif (Ω)

Pada rangkaian seri RLC dapat mempunyai beberapa kemungkinan yaitu :

a. Jika nilai $X_L > X_C$ maka rangkaian akan bersifat seperti induktor, yaitu tegangan mendahului arus dengan beda sudut fase θ yang besarnya dinyatakan dengan

$$\text{tg } \theta = \frac{(X_L - X_C)}{R} \qquad \text{.... (6.28)}$$

b. Jika nilai $X_L < X_C$ maka rangkaian akan bersifat seperti kapasitor, yaitu tegangan ketinggalan terhadap arus dengan beda sudut fase θ yang besarnya dinyatakan

dengan

$$\text{tg } \theta = \frac{(X_L - X_C)}{R} \quad .... (6.29)$$

c. Jika nilai $X_L = X_C$ maka besarnya impedansi rangkaian sama dengan nilai hambatannya (Z = R) maka pada rangkaian akan terjadi resonansi yang disebut resonansi deret/seri yang besarnya frekuensi resonansi dapat dicari

yaitu :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \quad .... (6.30)$$

Contoh Soal

Suatu rangkaian seri RLC yang masing-masing nilai R = 60 Ω, X_L = 0,24 H, dan C = 50 μF dihubungkan dengan sumber tegangan sebesar V = 200 sin 500t.

Tentukan :

a. reaktansi induktif,
b. reaktansi kapasitif,
c. impedansi,
d. kuat arus yang mengalir pada rangkaian,
e. beda potensial pada masing-masing komponen (V_R, V_L dan V_C),
f. pergeseran fase antara tegangan dan arus,
g. persamaan sesaat arus listrik, dan
h. frekuensi resonansi rangkaian RLC tersebut!

Penyelesaian :

Dari persamaan tegangan $V = V_{max} \sin \omega t$ dapat diperoleh bahwa V_{max} = 200 *volt* dan ω = 500 *rad/s*, sehingga dapat dicari :

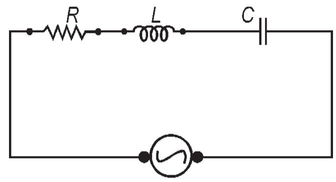
a. $X_L = \omega L = 500 \times 0{,}24 = 120\ \Omega$

b. $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{5 \times 10^2 \times 5 \times 10^{-5}} = \frac{1}{25 \times 10^{-3}}$

$= \frac{1000}{25} = 40\ \Omega$

c. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(60)^2 + (120 - 40)^2}$

$= \sqrt{3600 + 6400} = \sqrt{10000} = 100\ \Omega$

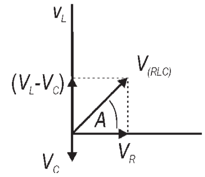


d. $I = \dfrac{V}{Z} = \dfrac{200}{100} = 2$ A

e. $V_R = I \times R = 2 \times 60 = 120$ volt

$V_L = I \times X_L = 2 \times 120 = 240$ volt

$V_C = I \times X_C = 2 \times 40 = 80$ volt



f. $\text{tg}\ \theta = \dfrac{(X_L - X_C)}{R} = \dfrac{(120 - 40)}{60} = \dfrac{80}{60} = \dfrac{8}{6} = 1\dfrac{1}{3} = 1$

atau $\theta = 53^o$

g. $I = 2 \sin (\omega t - 53^o)$ yaitu arus ketinggalan terhadap tegangan karena $X_L > X_C$.

h. $f = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{LC}} = \dfrac{1}{2.3,14}\sqrt{\dfrac{1}{0,24.5.10^{-5}}}$

$= \dfrac{1}{6.28}\sqrt{\dfrac{1}{1,2.10^{-5}}} = \dfrac{288,67}{6,28} = 46$ Hz

Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Apabila kita melihat burung-burung merpati yang hinggap pada kawat jaringan transmisi tegangan tinggi tidak mengalami apa-apa. Sedangkan seseorang yang sedang memperbaiki antene TV yang tiangnya terbuat dari besi menyentuh kawat listrik tegangan tinggi dapat menyebabkan orang tersebut meninggal karena kesetrum aliran listrik.

Coba kamu jelaskan apa sebabnya orang tersebut bisa meninggal, sedangkan burung merpati tidak?

Soal Latihan :

1. Sebuah rangkaian seri RLC yang terdiri atas $R = 500\ \Omega$, $L = 0,1$ H dan $C = 5\ \mu$F dipasang pada tegangan AC yang mempunyai tegangan 100 volt dan frekuensi linier 50 Hz.

   Hitunglah :

   a. impedansi rangkaian, dan

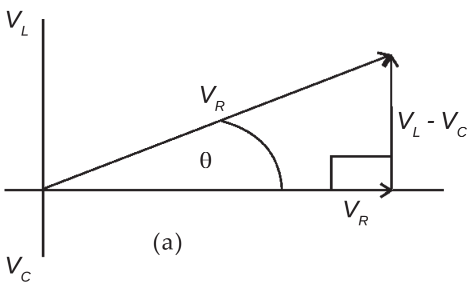
   b. kuat arus yang mengalir dalam rangkaian!

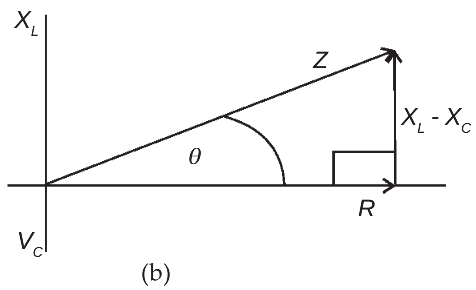
2. Rangkaian seri RLC yang terdiri atas $R = 3000\ \Omega$, $L = 0{,}4$ H, dan $C = 0{,}2\ \mu$F dihubungkan dengan sumber tegangan yang memiliki frekuensi sudut 5000 rad/s.

   Hitunglah :

   a. impedansi rangkaian,
   b. sudut fase antara V dan I, dan
   c. frekuensi resonansi rangkaian tersebut!

C. Faktor Daya





***Gambar 6.12** (a) Diagram fasor tegangan, (b) Diagram fasor impedansi*

Setiap alat-alat listrik seperti halnya lampu, seterika listrik, kompor listrik, ataupun alat-alat elektronik, misalnya TV, radio, komputer jika dinyalakan/dihidupkan beberapa lama akan memerlukan energi listrik . Energi yang diperlukan tiap satu satuan waktu atau tiap detiknya disebut *daya*.

Besarnya daya pada rangkaian arus bolak-balik antara teori dengan hasil sesungguhnya dari hasil pembacaan alat ukur tidak sama, hal ini disebabkan adanya hambatan semu yang berasal dari induktor (X_L) dan kapasitor (X_C) yang disebut reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif. Daya sesungguhnya yang timbul pada rangkaian arus listrik hanyalah pada hambatan murni saja (R). Perbandingan antara daya sesungguhnya (P_{ss}) dan daya semu yang menurun (P_{sm}) disebut *faktor daya* yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\cos\theta = \frac{P_{ss}}{P_{sm}} \qquad \text{.... (6.31)}$$

di mana :

$P_{ss} = I^2 R$ (daya sesungguhnya) dan

$P_{sm} = I^2 Z$ (daya semu)

Sehingga : $\cos\theta = \dfrac{I^2 R}{I^2 Z} = \dfrac{R}{Z}$

Jadi daya sesungguhnya dalam rangkaian arus AC dapat dinyatakan sama dengan hasil perkalian daya hasil perhitungan teoritis dengan faktor daya yang secara umum dapat dituliskan :

$$P = V\,I \cos \theta \qquad \text{.... (6.32)}$$

di mana :

P = daya sesungguhnya (watt)
V = tegangan efektif (Volt)
I = kuat arus efektif (A)
$\cos \theta$ = faktor daya

Contoh Soal

Sebuah rangkaian seri RLC, dengan R = 800 Ω, X_L = 600 Ω dan X_C = 1200 Ω dihubungkan dengan sumber tegangan yang memiliki tegangan efektif 200 Volt.

Tentukan :

a. kuat arus dalam rangkaian,
b. faktor daya rangkaian tersebut, dan
c. daya sesungguhnya dalam rangkaian!

Penyelesaian :

Diketahui : R = 800 Ω
X_L = 600 Ω
X_C = 1200 Ω
V = 200 volt

Ditanyakan : a. I = ...?
b. $\cos \theta$ = ...?
c. P = ... ?

Jawab :

a. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{800^2 + (600 - 1200)^2}$

$= \sqrt{(640000 + 360000)} = \sqrt{1000000} = 1000\ \Omega$

$I = \dfrac{V}{Z} = \dfrac{200}{1000} = 0{,}2$ A

b. $\cos \theta = \dfrac{R}{Z} = \dfrac{800}{1000} = 0{,}8$

c. $P = V\,I \cos \theta$ = 200.0,2.0,8 = 32 watt.

Soal Latihan :

Rangkaian seri RLC dengan X_L = 180 W dan X_C = 150 W, dihubungkan dengan sumber tegangan yang memiliki tegangan efektif sebesar 200 volt. Apabila kuat arus efektif yang mengalir pada rangkaian tersebut sebesar 4 A, hitunglah :

a. besarnya nilai hambatannya (R),
b. besarnya faktor daya dari rangkaian, dan
c. daya sesungguhnya yang terpakai dalam rangkaian!

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

Buatlah rancangan untuk membuat rangkaian jaringan listrik di rumahmu yang terdiri atas 4 buah titik lampu dan 3 buah stop kontak untuk 4 buah kamar dengan menggunakan gambar serta rencana pembiayaan untuk membeli barang-barang yang dibutuhkan secara lengkap!

Ringkasan

1. Arus dan tegangan AC (bolak-balik) yaitu arus dan tegangan listrik yang nilainya berubah-ubah secara kontinu atau periodik.
2. Alat-alat ukur arus bolak-balik hasil pengukurannya menunjukkan nilai efektifnya.
3. Untuk dapat mengetahui nilai maksimum dari kuat arus dan tegangan AC dapat diukur menggunakan alat yang disebut CRO kependekan (*Cathoda Rays Osciloskop).*
4. Untuk menggambarkan suatu besaran yang nilainya selalu berubah-ubah secara periodik digunakan diagram fasor.
5. Nilai efektif arus dan tegangan bolak-balik yaitu arus/tegangan AC yang setara dengan arus searah (DC) yang dilewatkan pada suatu penghantar yang sama dalam waktu yang sama akan menghasilkan kalor yang sama. Hubungan antara harga efektif dengan harga maksimum arus dan tegangan bolak balik dinyatakan dalam persamaan :

   $I_{ef} = 0{,}707\ I_{max}$ dan $V_{ef} = 0{,}707\ V_{max}$
6. Nilai rata-rata arus dan tegangan AC (bolak-balik) yaitu arus/tegangan AC yang setara dengan arus/tegangan DC (searah) untuk memindahkan muatan listrik pada suatu penghantar dalam waktu yang sama dalam jumlah yang sama. Hubungan antara nilai rata-rata dan nilai maksimum arus dan tegangan bolak-balik dinyatakan dalam persamaan :

   $I_r = I_{max}/\pi$ dan $V_r = V_{max}/\pi$
7. Pada rangkaian hambatan murni, antara arus dan tegangan tidak terjadi perbedaan fase.

8. Pada rangkaian murni induktor, antara arus dan tegangan terjadi beda fase sebesar 90° di mana tegangan mendahului arus,

   $V = V_{max} \sin \omega t$ dan

   $I = I_{max} \sin (\omega t - 90^o)$

9. Pada rangkaian murni kapasitor, antararus dan tegangan terjadi beda fase sebesar 90° di mana arus mendahului tegangan.

   $V = V_{max} \sin \omega t$ dan

   $I = I_{max} \sin (\omega t + 90^o)$

10. Pada rangkaian seri RL, antara arus dan tegangan terjadi beda fase kurang dari 90° di mana tegangan mendahului arus.

    $V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$ atau $Z = \sqrt{R^2 + X_L{}^2}$

11. Pada rangkaian seri RC, antara arus dan tegangan terjadi beda fase kurang dari 90° di mana arus mendahului tegangan

    $V = \dfrac{1}{1000\pi^2}$ atau $Z = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$

12. Pada rangkaian seri RLC rangkaian akan dapat memiliki tiga kemungkinan yaitu :

    a. Arus mendahului tegangan jika $X_C > X_L$

    b. Arus ketinggalan terhadap tegangan jika $X_L > X_C$

    c. Arus dan tegangan sefase jika $X_L = X_C$

    d. Pada rangkaian RLC berlaku

    $V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$ atau

    $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

13. Pada rangkaian seri RLC akan terjadi resonansi seri atau deret jika nilai $X_L = X_C$ atau $Z = R$ yang besarnya frekuensi resonansi dinyatakan :

    $f = \dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{1}{LC}}.$

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

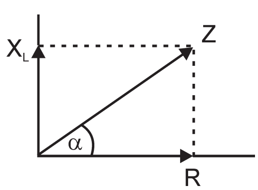
1. Beda sudut fase antara tegangan dan arus pada rangkaian arus bolak-balik kapasitor murni adalah ....
   A. arus dan tegangan sefase
   B. arus tertinggal sebesar $\frac{\pi}{4}$, terhadap tegangan
   C. arus tertinggal sebesar π, terhadap tegangan
   D. tegangan tertinggal sebesar $\frac{\pi}{2}$, terhadap arus
   E. tegangan mendahului arus sebesar π

2. Bila rangkaian arus AC yang terdiri dari induktor murni, frekuensi sumbernya dibuat dua kali semula, maka ....
   A. induktansi induktor menjadi 4 kali
   B. kecepatan angulernya menjadi 0,5 kali
   C. reaktansi induktifnya menjadi 0,5 kali
   D. impedansinya tetap
   E. kuat arusnya menjadi 0,5 kali

3. Dalam rangkaian arus bolak-balik, kuat arus yang mengalir dinyatakan dengan persamaan $i = 2 \sin \pi (100t - 0{,}25)$ Ampere dan tegangan sumbernya $V = 100 \sin 100t$. Dari data tersebut dapat diinterprestasikan ....
   A. impedansi rangkaian 50 ohm
   B. frekuensi sumber 100 Hz
   C. rangkaian bersifat kapasitif
   D. rangkaian terdiri dari induktor murni
   E. tegangan mendahului arus sebesar 90°

4. Sebuah rangkaian seri RLC dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik 200 volt. Jika $R = 120\ \Omega$, $X_L = 180\ \Omega$, dan $X_C = 90\ \Omega$ maka ....
   A. impedansi rangkaian 200 ohm
   B. besarnya arus yang mengalir 1,5 Ampere
   C. besarnya tegangan induktor 240 volt
   D. besarnya faktor daya 0,6
   E. arus mendahului tegangan

5. Rangkaian seri RLC dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik. Rangkaian ini akan mengalami resonansi apabila ....
   A. impedansi rangkaian mencapai harga maksimum
   B. arus dalam rangkaian minimum
   C. $L = C$
   D. arus mendahului tegangan sebesar $\frac{1}{2}\pi$
   E. $Z = R$



6. Dalam rangkaian seri R = 60 ohm dan induktor dalam sumber tegangan bolak-balik, kuat arus yang lewat 2 A. Apabila dalam diagram vektor di samping tg $\alpha = \frac{3}{4}$, maka tegangan induktor ....
   A. 72 volt
   B. 90 volt
   C. 120 volt
   D. 160 volt
   E. 200 volt

7. Suatu rangkaian seri RLC dihubungkan dengan sumber tegangan $V = 100\sqrt{2}$ sin 100 t volt. Besar hambatan murni 600 Ω. Induktansi diri kumparan 2 Henry dan kapasitas kapasitor 10 μF. Daya dari rangkaian tersebut adalah ....
   A. 6 watt
   B. 8 watt
   C. 10 watt
   D. 12 watt
   E. 60 wat

8. Rangkaian RLC seri memiliki impedansi minimum. Jika R = 100 Ω; L = 0,1 H; $C = \dfrac{1}{1000\pi^2}$ F, maka frekuensi tegangan bolak-balik yang terpasang adalah ....
   A. 10 Hz
   B. 25 Hz
   C. 50 Hz
   D. 100 Hz
   E. 150 Hz

9. Sebuah induktor yang diukur dengan ohm meter memiliki hambatan sebesar 24 ohm. Jika induktor tersebut dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik, ternyata ampermeter menunjuk 2 A dan voltmeter menunjukkan 60 volt. Reaktansi induktif induktor tersebut sebesar ... ohm.
   A. 12
   B. 18
   C. 20
   D. 24
   E. 30

10. Suatu rangkaian arus bolak-balik dengan R = 80 ohm dan reaktansi kapasitif 60 ohm dihubungkan dengan tegangan 220 volt. Besar kuat arus yang mengalir pada rangkaian adalah … ampere.
   A. 2,2
   B. 2,4
   C. 2,6
   D. 2,8
   E. 3,2

B. Kerjakan soal di bawah ini!

1. Jika sebuah voltmeter menunjukkan tegangan sebesar 220 volt, hitung berapa tegangan maksimumnya!
2. Sebuah hambatan sebesar 60 Ω dipasang seri dengan sebuah induktor yang memiliki reaktansi induktif sebesar 80 Ω, dan dipasang pada tegangan AC sebesar 220 Volt. Hitunglah besarnya kuat arus yang mengalir pada rangkaian tersebut?

3. Pada suatu rangkaian AC terdapat hubungan seri antara hambatan 40 Ω dan kapasitor 0,1 μF yang dihubungkan dengan sumber tegangan 120 Volt sehingga dalam rangkaian itu mengalir arus sebesar 2,5 ampere. Hitunglah besarnya frekuensi linier sumber tegangannya!
4. Pada suatu rangkaian seri RLC di mana R = 25 Ω, L = 40 mH, dan C = 0,6 μF, tentukan berapa frekuensi resonansi rangkaian tersebut!
5. Sebuah hambatan 30 Ω dipasang seri dengan sebuah kapasitor yang memiliki reaktansi kapasitif sebesar 40 Ω, dan dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar 220 Volt.

   Hitunglah :

   a. kuat arus yang mengalir dalam rangkaian,
   b. sudut fase antara arus dan tegangan, dan
   c. daya yang hilang dalam rangkaian!

Refleksi

Setelah mempelajari pada bab VI ini, diharapkan kalian memahami tentang :

1. formulasi rangkaian arus bolak-balik,
2. formulasi jenis dan sifat rangkaian arus bolak-balik.

Apabila masih ada materi yang belum kalian pahami pelajari kembali materi pada bab ini sebelum mempelajari materi berikutnya.

Uji Kompetensi Akhir Semester 1

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Sebuah gelombang berjalan merambat pada seutas tali dengan amplitudo 1 cm dan periode 0,2 s. Jika cepat rambat gelombang pada tali 2,5 $m.s^{-1}$ maka besarnya beda fase antara dua titik A dan B yang berjarak 40 cm pada tali tersebut adalah ....
   A. $\frac{1}{5}$ D. $\frac{4}{5}$
   B. $\frac{2}{5}$ E. 1
   C. $\frac{3}{5}$

2. Jumlah energi bunyi yang menembus secara tegak lurus permukaan bidang tiap satu-satuan luas dan tiap satuan waktu disebut ....
   A. daya bunyi
   B. ambang perasaan
   C. ambang pendengaran
   D. intensitas bunyi
   E. taraf intensitas bunyi

3. Sebuah kapal terbang bergerak mendekati menara sirine yang berbunyi dengan frekuensi 1000 Hz. Jika frekuensi bunyi sirine yang didengar awak pesawat adalah 1100 Hz dan cepat rambat gelombang bunyi saat itu adalah 340 $m.s^{-1}$ maka cepat rambat pesawat tersebut adalah ....
   A. 8,5 $m.s^{-1}$ D. 68 $m.s^{-1}$
   B. 17 $m.s^{-1}$ E. 357 $m.s^{-1}$
   C. 34 $m.s^{-1}$

4. Gelombang bunyi dengan frekuensi 256 Hz merambat di udara dengan kecepatan 330 $m.s^{-1}$. Kecepatan rambat gelombang bunyi dengan frekuensi 512 Hz di udara adalah ....
   A. 165 $m.s^{-1}$ D. 825 $m.s^{-1}$
   B. 330 $m.s^{-1}$ E. 1320 $m.s^{-1}$
   C. 660 $m.s^{-1}$

5. Sebuah dawai panjangnya 80 cm yang kedua ujungnya terikat. Dawai tersebut diberi tegangan sedemikian rupa sehingga cepat rambat gelombang pada dawai tersebut adalah 400 $m.s^{-1}$, maka frekuensi nada dasar yang dihasilkan adalah ....
   A. 125 Hz
   B. 250 Hz
   C. 320 Hz
   D. 500 Hz
   E. 640 Hz

6. Nada atas pertama pipa organa terbuka tepat beresonansi dengan nada atas pertama pipa organa tertutup yang panjangnya 90 cm, maka panjang pipa organa terbukanya adalah ....
   A. 1,0 m
   B. 1,2 m
   C. 1,3 m
   D. 1,4 m
   E. 1,5 m

7. Sepotong tali yang panjangnya 20 meter massanya 1 kg diberi tegangan 320 N, besarnya cepat rambat gelombang pada tali tersebut adalah ....
   A. 40 $m.s^{-1}$
   B. 50 $m.s^{-1}$
   C. 60 $m.s^{-1}$
   D. 70 $m.s^{-1}$
   E. 80 $m.s^{-1}$

8. Intensitas bunyi dapat diperbesar dengan jalan ....
   A. memperbesar frekuensi dan amplitudonya
   B. memperbesar frekuensi saja
   C. memperkecil frekuensi dan amplitudonya
   D. memperbesar amplitudonya saja
   E. memperkecil frekuensinya saja

9. Taraf intensitas bunyi pada suatu jendela yang luasnya 1 m^2 adalah 60 dB. Jika besarnya ambang pendengaran 10^{-12} W^{-2} maka daya akustik yang masuk melalui jendela tersebut adalah ... Watt.
   A. 10^{-4}
   B. 10^{-6}
   C. 10^{-8}
   D. 10^{-10}
   E. 10^{-12}

10. Pada percobaan resonansi dengan tabung resonator, ternyata terjadi resonansi yang pertama kali jika panjang kolom udara dalam tabung di atas permukaan air setinggi 20 cm, maka resonansi yang ke dua kali akan terjadi jika panjang kolom udara dalam tabung adalah ....
    A. 20 cm
    B. 40 cm
    C. 60 cm
    D. 80 cm
    E. 100 cm

11. Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan 36 km/jam sambil membunyikan sirine dengan frekuensi 400 Hz. Jika cepat rambat gelombang bunyi 300 m/s maka frekuensi bunyi sirine yang didengar oleh orang yang diam di tepi jalan pada saat mobil itu menjauhinya adalah ....
    A. 380 Hz
    B. 387 Hz
    C. 400 Hz
    D. 410 Hz
    E. 420 Hz

12. Jika sebuah pipa organa terbuka ditiup sehingga menghasilkan nada atas kedua maka akan terjadi ....
    A. 2 simpul dan 3 perut
    B. 3 simpul dan 4 perut
    C. 4 simpul dan 5 perut
    D. 3 simpul dan 3 perut
    E. 4 simpul dan 4 perut

13. Jarak antara 5 buah simpul yang berurutan pada gelombang stasioner yang terjadi pada tali dengan ujung tetap adalah 40 cm. Jika cepat rambat gelombang yang terjadi 20 m/s maka frekuensi gelombangnya adalah ....
    A. 40 Hz
    B. 60 Hz
    C. 80 Hz
    D. 100 Hz
    E. 120 Hz

14. Pada percobaan Young jika jarak antara dua celah dijadikan dua kali semula maka antara dua garis terang yang berurutan menjadi ....
    A. $\frac{1}{4}$ kali semula
    B. $\frac{1}{2}$ kali semula
    C. 2 kali semula
    D. 4 kali semula
    E. tetap tidak berubah

15. Pada percobaan Young dua buah celah terpisah pada jarak 1 mm dan sebuah layar diletakkan 2 meter dari celah. Seberkas sinar monokromatik yang memiliki panjang gelombang 5600 Å dijatuhkan tegak lurus celah maka jarak garis gelap orde pertama pada layar dari terang pusat adalah …
A. 0,28 mm
B. 0,56 mm
C. 2,80 mm
D. 5,60 mm
E. 2,80 cm

16. Dua celah sempit terpisah pada jarak 2 mm disinari tegak lurus dan sebuah layar diletakkan pada jarak 1 m di belakang celah. Jika garis terang orde ke tiga terletak 7,5 mm dari terang pusat maka panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah ....
A. 4500 Å
B. 5000 Å
C. 5600 Å
D. 6000 Å
E. 6600 Å

17. Warna ungu dari spektrum orde ke-3 berimpit dengan warna merah orde ke-2 dari suatu peristiwa difraksi pada kisi, hal ini menunjukkan bahwa perbandingan panjang gelombang cahaya ungu dan cahaya merah adalah ....
A. 3 : 2
B. 2 : 3
C. 4 : 9
D. 9 : 4
E. 3 : 5

18. Pola interferensi minimum orde ke-2 pada difraksi cahaya pada celah tunggal terjadi pada sudut difraksi 30^o. Jika panjang gelombang yang digunakan adalah 6000 Å maka lebar celah adalah ....
A. 0,23 mm
B. 0,24 mm
C. 0,32 mm
D. 0,42 mm
E. 0,52 mm

19. Cahaya termasuk dalam gelombang tranversal, hal ini dibuktikan dalam percobaan yang menunjukkan adanya gejala ....
A. interferensi cahaya
B. difraksi cahaya
C. polarisasi cahaya
D. refraksi cahaya
E. refleksi cahaya

20. Sebuah prisma sama sisi berada di udara. Apabila sudut deviasi minimum yang terjadi pada prisma tersebut sebesar 30° maka indeks bias prisma adalah ....
A. $\frac{1}{2}\sqrt{2}$
B. $\frac{1}{2}\sqrt{3}$
C. $\sqrt{2}$
D. $\sqrt{3}$
E. $\frac{3}{2}$

21. Dua buah muatan listrik A dan B terpisah pada jarak 30 cm dan kedua muatan tolak-menolak dengan gaya sebesar 0,8 N. Jika muatan A dua kali muatan B maka besarnya muatan masing-masing benda tersebut adalah ....
A. 4 μC dan 2 μC
B. 4 μC dan 2 μC
C. 4 nC dan 2 nC
D. 4 pC dan 2 pC
E. 4 C dan 2 C

22. Dua buah muatan listrik q_1 = 4 μC dan q_2 = -16 μC terpisah pada jarak 9 cm . Letak kedudukan titik yang mempunyai kuat medan listriknya sama dengan nol adalah ....
A. 3 cm dari q_1 dan 6 cm dari q_2
B. 3 cm dari q_2 dan 6 cm dari q_1
C. 3 cm dari q_1 dan 9 cm dari q_2
D. 3 cm dari q_2 dan 9 cm dari q_1
E. 4 cm dari q_1 dan 5 cm dari q_2

23. Sebuah segi tiga ABC sama sisi yang panjang sisinya 30 cm. Pada masing-masing titik sudut berturut-turut terdapat muatan listrik sebesar q_A = + 1 μC , q_B = + 2 μC dan q_C = - 3 μC. Besarnya gaya Coulomb yang dialami oleh q_A adalah ....
A. 0,26 N
B. 0,32 N
C. 0,36 N
D. 0,52 N
E. 0,62 N

24. Kapasitas suatu kapasitor keping sejajar menjadi lebih kecil apabila ....
A. muatan pada setiap keping diperkecil
B. beda potensial kedua keping diperkecil
C. luas permukaan keping diperbesar
D. jarak antara keping diperbesar
E. jarak antar keping diperkecil

25. Sebuah kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan 100 Volt besarnya energi yang tersimpan pada kapasitor adalah 2,5 Joule. Besarnya kapasitas kapasitornya dalah ....
A. 5 μF
B. 50 μF
C. 500 μF
D. 50 nF
E. 500 nF

26. Dua buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 5 μF dan 10 μF disusun secara seri kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan 30 Volt. Besarnya muatan listrik yang tersimpan pada kapasitor 10 μF adalah ....
A. 50 μC
B. 100 μC
C. 150 μC
D. 200 μC
E. 300 μC

27. Tiga buah kapasitor yang masing-masing kapasitasnya 4 μF, 6 μF dan 10 μF disusun paralel kemudian dipasang pada tegangan 20 Volt. Besarnya muatan listrik yang tersimpan pada kapasitor 6 μF adalah ....
A. 40 μC
B. 80 μC
C. 120 μC
D. 200 μC
E. 400 μC

28. Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus listrik 10 A dan sebuah titik berada 4 cm dari kawat. Jika μ_o = 4p.10^{-7} Wb $A^{-1}m^{-1}$, maka besar induksi magnetiknya adalah ... Wb m^{-2}.
   A. 0,5 x 10^{-4}
   B. 1,0 x 10^{-4}
   C. 3,14 x 10^{-4}
   D. 4,0 x 10^{-4}
   E. 5,0 x 10^{-4}

29. Induksi magnetik di pusat solenoida yang terdiri atas 1000 lilitan dan panjangnya 50 cm adalah 8π x 10^{-4} T. Kuat arus listrik yang mengalir pada solenoida tersebut adalah ....
   A. 0,25 A
   B. 0,50 A
   C. 0,75 A
   D. 1,00 A
   E. 2,00 A

30. Dua buah kawat panjang sejajar terpisah pada jarak 1 meter dan dialiri arus listrik masing-masing sebesar 1 A dalam arah yang sama. Besarnya gaya Lorentz persatuan panjang yang dialami oleh salah satu kawat adalah ....
   A. 0,5 x 10^{-7} N
   B. 1,0 x 10^{-7} N
   C. 2,0 x 10^{-7} N
   D. 3,0 x 10^{-7} N
   E. 4,0 x 10^{-7} N

31. Suatu muatan positif dari 0,2 C bergerak dengan kecepatan 2 m/s dalam medan magnet sebesar 5 Wb m^{-2}. Arah kecepatan muatan itu sejajar dengan arah medan magnet. Gaya yang dialami muatan tersebut adalah ....
   A. 0 N
   B. 0,4 N
   C. 0,5 N
   D. 1,0 N
   E. 2,0 N

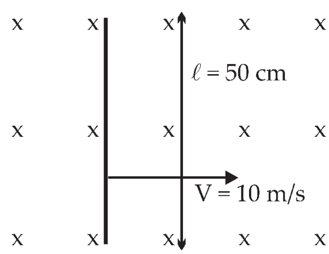
32. Sebuah penghantar lurus panjang dialiri arus listrik sebesar 1,5 A. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan 5.10^5 ms^{-1} searah arus dalam penghantar, berjarak 0,1 m dari penghantar itu. Jika muatan elektron -1,6 x 10^{-19} C , maka gaya Lorentz yang dialami elektron tersebut adalah ....
   A. 1,5 x 10^{-20} N
   B. 2,4 x 10^{-20} N
   C. 3,2 x 10^{-19} N
   D. 4,2 x 10^{-19} N
   E. 5,0 x 10^{-19} N

33. Sebuah kawat penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari 10 cm terdiri atas 5 lilitan dialiri arus listrik sebesar 2 A. Jika $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ WbA^{-1}m^{-1} maka besarnya induksi magnetik di titik pusat lingkaran tersebut adalah ....
   A. $2\pi \times 10^{-5}$ T
   B. $4\pi \times 10^{-5}$ T
   C. $2\pi \times 10^{-6}$ T
   D. $4\pi \times 10^{-6}$ T
   E. $2\pi \times 10^{-4}$ T

34. Sebuah kawat penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari 5 cm. Jika induksi magnetik pada pusat kumparan tersebut adalah 4×10^{-4} Wb m^2, maka besarnya induksi magnetik pada sebuah titik yang terletak pada sumbu lingkaran berjarak 5 cm dari titik pusat lingkaran adalah ....
   A. $2,80 \times 10^{-4}$ Wb m^{-2}
   B. $1,40 \times 10^{-4}$ Wb m^{-2}
   C. $2,60 \times 10^{-4}$ Wb m^{-2}
   D. $3,70 \times 10^{-4}$ Wb m^{-2}
   E. $3,80 \times 10^{-4}$ Wb m^{-2}

35. Berikut ini alat-alat yang bekerja berdasarkan prinsip gaya Lorentz (gaya magnetik) **kecuali** ....
   A. motor listrik
   B. kipas angin
   C. transformator
   D. ampermeter
   E. voltmeter

36. Sebuah kawat penghantar yang panjangnya 50 cm digerakkan dalam medan magnet homogen sebesar 0,5 T (arahnya masuk bidang gambar) dengan kecepatan 10 m/s. Apabila arah gerakannya memotong tegak lurus medan magnet (lihat gambar) maka pada ujung-ujung kawat penghantar timbul gaya gerak listrik induksi sebesar ....
   A. 0,25 V
   B. 2,50 V
   C. 25,0 V
   D. 0,50 V
   E. 5,00 V



37. Sebuah kumparan yang mempunyai induktansi diri 500 mH. Apabila dalam kumparan tersebut terjadi perubahan arus listrik dari 500 mA menjadi 100 mA dalam waktu 0,01 s, maka pada ujung-ujung kumparan akan timbul ggl induksi diri sebesar ....
    A. 0,2 V
    B. 2,0 V
    C. 20 V
    D. 2 mV
    E. 20 mV

38. Sebuah kumparan terdiri atas 400 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan ini bersumbu tegak lurus medan magnet 0,2 Tesla dan diputar dengan kecepatan sudut 100 rad/s. Pada ujung kumparan akan timbul ggl induksi maksimum sebesar ....
    A. 20 V
    B. 40 V
    C. 60 V
    D. 80 V
    E. 100 V

39. Menaikkan gaya gerak listrik maksimum suatu generator AC agar menjadi 4 kali semula dapat dilakukan dengan cara ....
    A. jumlah lilitan dibuat dua kali lipat dan periode putarnya dibuat $\frac{1}{2}$ kalinya
    B. kecepatan sudut dan luas penampang kumparan dijadikan $\frac{1}{2}$ kalinya
    C. induksi magnet dan jumlah lilitannya dijadikan 4 kali semula
    D. luas penampang dan periode putarnya dijadikan 2 kali semula
    E. penampang dan periode putarnya dijadikan $\frac{1}{2}$ kali semula

40. Sebuah transformator *step down* mempunyai efisiensi 80 % dihubungkan dengan sumber tegangan 250 V/ 500 W. Apabila tegangan sekunder yang timbul 25 V maka kuat arus sekundernya adalah ....
A. 8 A
B. 12 A
C. 16 A
D. 18 A
E. 20 A

41. Sebuah solenoida yang panjangnya 30 cm dan luas penampangnya 4 cm^2 terdiri atas 1000 lilitan. Di atas solenoida tersebut dibelitkan kawat lain yang terdiri atas 300 lilitan . Besarnya induktansi silang (induktansi timbal balik) pasangan kumparan tersebut adalah ....
A. $4\pi \times 10^{-4}$ H
B. $8\pi \times 10^{-4}$ H
C. $16\pi \times 10^{-4}$ H
D. $8\pi \times 10^{-5}$ H
E. $16\pi \times 10^{-5}$ H

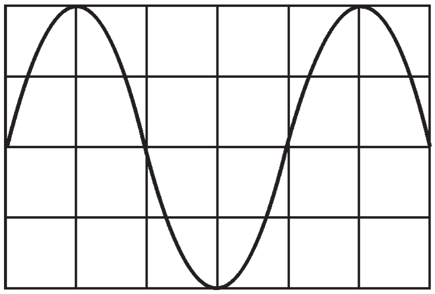
42. Sebuah kumparan yang terdiri 500 lilitan dialiri arus listrik yang konstan sebesar 5 A sehingga membangkitkan fluks magnetik 4×10^{-3} Wb, maka besarnya induktansi diri kumparan tersebut adalah ....
A. 0,02 H
B. 0,04 H
C. 0,20 H
D. 0,40 H
E. 0,50 H

43. Sebuah generator yang mempunyai luas penampang 200 cm^2 dan terdiri atas 1000 lilitan dan memiliki induksi magnetik sebesar 0,5 Wb m^{-2}. Jika generator tersebut diputar dengan kecepatan sudut 100 rad s^{-1} maka besarnya ggl induksi yang ditimbulkan pada saat sudut fasenya 150^o adalah ....
A. 250 V
B. 500 V
C. 750 V
D. 1000 V
E. 1500 V

44. Sebuah induktor jika dipasang pada sumber tegangan DC sebesar 8 Volt pada induktor mengalir arus listrik sebesar 0,2 A dan jika dipasang pada sumber tegangan AC baru akan mengalir arus sebesar 0,2 A jika tegangan sumbernya 10 V. Besarnya reaktansi induktif induktor tersebut adalah ....

A. 20 ohm
B. 30 ohm
C. 40 ohm
D. 50 ohm
E. 60 ohm

45. Pada sebuah osiloskop tombol pengatur vertikal menunjuk 3 V/cm dan pengatur horizontal 5 ms/cm, jika tampilan pada layar osiloskop seperti gambar di bawah ini!



Dari tampilan gambar sinyal tersebut menyatakan bahwa besarnya tegangan maksimumnya (V_{max}) dan frekuensi yang terukur adalah ....

A. 3 Volt dan 50 Hz
B. 3 Volt dan 100 Hz
C. 6 Volt dan 50 Hz
D. 6 Volt dan 100 Hz
E. 6 Volt dan 25 Hz

46. Sebuah rangkaian seri *R-L* dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar 100 Volt. Jika tegangan antara ujung-ujung hambatan *R* diukur dengan menggunakan volt meter adalah 60 Volt, maka besarnya tegangan pada ujung-ujung L adalah ....

A. 40 V
B. 60 V
C. 80 V
D. 100 V
E. 160 V

47. Sebuah rangkaian seri RLC yang terdiri atas $R = 100$ ohm, $L = 0{,}4/\pi$ H dan $1000/\pi$ μF . Besarnya frekuensi resonansi yang terjadi pada rangkaian tersebut adalah ....
A. 100 Hz
B. 250 Hz
C. 500 Hz
D. 750 Hz
E. 1000 Hz

48. Sebuah rangkaian seri RLC yang terdiri atas $R = 50$ ohm, $X_L = 80$ ohm dan $X_C = 40$ ohm dihubungkan dengan sumber tegangan AC. Pernyataan yang benar mengenai rangkaian tersebut adalah ....
A. tegangan dan arus dalam rangkaian sefase
B. tegangan mendahului arus dengan beda sudut fase 90^o
C. tegangan ketinggalan terhadap arus dengan beda sudut fase 90^o
D. tegangan mendahului arus dengan beda sudut fase 53^o
E. tegangan ketinggalan arus dengan beda sudut fase 53^o

49. Sebuah rangkaian seri RLC yang terdiri atas $R = 60$ ohm, $X_L = 180$ ohm dan $X_c = 100$ ohm dihubungkan dengan sumber tegangan AC sebesar 200 Volt, maka besarnya daya sesungguhnya dari rangkaian tersebut adalah ....
A. 60 W
B. 100 W
C. 120 W
D. 180 W
E. 200 W

50. Pernyataan-pernyataan berikut berkaitan dengan saat terjadinya keadaan resonansi pada rangkaian seri RLC :
1. $X_L > X_c$
2. $X_L = X_c$
3. $X_L < X_c$
4. $Z = R$

Yang benar adalah pernyataan ....
A. 1 dan 3
B. 2 dan 3
C. 1 dan 4
D. 2 dan 4
E. 1 dan 2

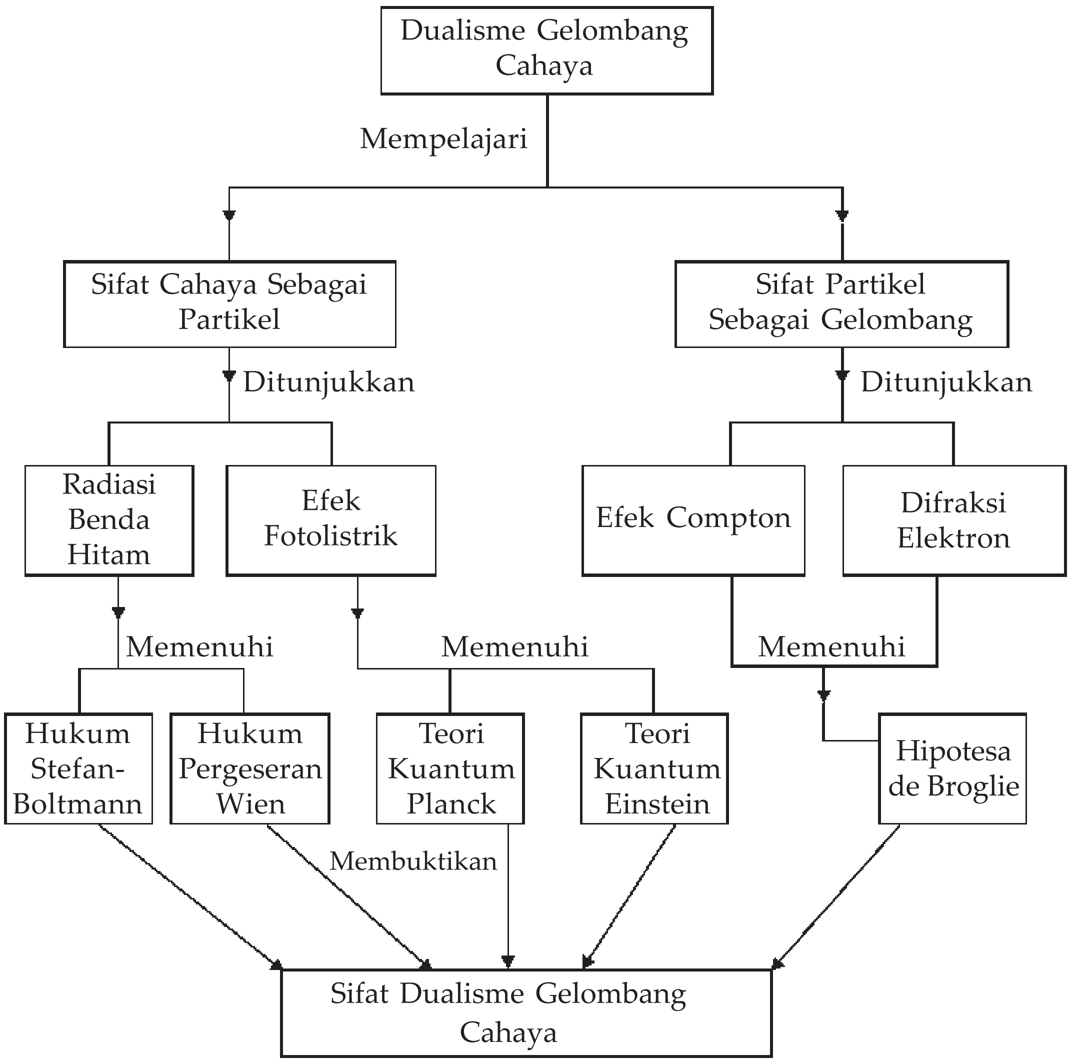
Bab VII
Dualisme Gelombang Cahaya



Sumber : HDI Energi & Fisika

Cukup mudah melihat efek-efek cahaya. Namun cahaya tersebut terbuat dari apa, dan bagaimana cahaya berjalan dari satu tempat ke tempat yang lain? Newton beranggapan bahwa cahaya mungkin terbuat dari partikel atau gelombang, dan ia tidak ingin salah satunya diabaikan. Partikel atau gelombangkah cahaya itu?

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini kalian dapat mengetahui dan mengalanisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat radiasi benda hitam.

Motivasi Belajar

Teori Fisika klasik yang menganggap bahwa cahaya merupakan gelombang ternyata tidak dapat menerangkan spektrum radiasi benda hitam. Max Plank, beranggapan bahwa cahaya dapat dianggap sebagai partikel. Teori ini diperkuat dengan adanya fenomena efek fotolistrik dan efek Compton. Sampai saat ini para ilmuwan masih beranggapan bahwa cahaya mempunyai sifat dualisme yaitu sebagai gelombang dan partikel.

Untuk memahami bagaimana hal itu bisa terjadi, maka pelajarilah bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

radiasi benda hitam, teori kuantum, efek fotolistrik, efek Compton

A. Radiasi Benda Hitam

Apabila sepotong besi kita panaskan, maka suhu logam tersebut akan mengalami kenaikan. Makin lama dipanaskan, suhunya semakin tinggi. Makin tinggi suhu benda akan menimbulkan ruangan di sekitar benda itu menjadi panas. Hal ini menunjukkan bahwa benda memancarkan energi kalor ke sekitarnya. Energi yang dipancarkan benda ke sekitarnya disebut *energi radiasi*. Energi radiasi yang dipancarkan sebuah benda dalam bentuk gelombang, yaitu *gelombang elektromagnetik*.

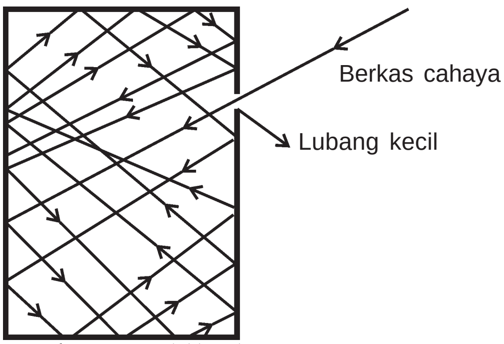
Faktor apa saja yang memengaruhi radiasi suatu benda? Jika kita berada di dekat benda yang panas, pada tubuh kita akan terasa panas. Tubuh akan terasa semakin panas apabila kita berada di dekat benda yang suhunya lebih tinggi. Serta panas yang kita rasakan akan semakin kuat jika benda yang berada di dekat kita berwarna gelap, di samping itu juga makin luas permukaan benda, semakin terasa panas yang kita rasakan. Di samping benda memancarkan panas, benda pun dapat menyerap panas (energi). Hal ini tergantung pada suhu antara benda dengan ruangan di sekitar benda. Apabila suhu benda lebih tinggi daripada suhu ruangan, benda akan memancarkan panas dan sebaliknya jika suhu benda lebih rendah, maka benda tersebut akan menyerap energi (panas).

Energi yang dipancarkan oleh suatu benda tidak tergantung pada jenis bendanya. Akan tetapi tergantung pada suhu benda itu dan sifat permukaan benda. Benda yang

mudah menyerap panas sekaligus merupakan benda yang memancarkan panas dengan baik. Makin tinggi suhu benda semakin besar energi yang dipancarkan. Tabel di bawah ini menunjukkan hubungan antara suhu benda dengan warna benda dari hasil eksperimen.

Suhu Benda dalam °C	Warna Benda
500 – 700	Merah tua
700 – 800	Merah
800 – 900	Merah jingga
900 – 1000	Jingga
1000- 1100	Kuning
1100 – 1300	Kuning muda
1300 – 1500	Putih

Ekperimen tentang radiasi kalor benda pertama kali dilakukan oleh **Joseph Stefan** dan **Ludwig Boltzmann**, diperoleh kesimpulan yang dinyatakan dalam rumus :



Gambar 7.1 *Model benda hitam sempurna yang menyerap radiasi melalui pemantulan berulang*

$$W = e\sigma AT^4 \quad \text{.... (7.1)}$$

dengan:

W = intensitas radiasi kalor yang dipancarkan benda tiap detiknya (watt)

e = emisivitas benda

σ = kontante Stefans – Boltzmann ($5{,}670 \times 10^{-8}$ Wm^{-2}K^{-4})

A = luas permukaan benda (m^2)

T = suhu benda (K)

Persamaan (5.1) disebut dengan **Hukum Stefan – Boltzmann**. *Emisivitas* adalah konstanta yang besarnya tergantung pada sifat permukaan benda yang mempunyai nilai antara 0 hingga 1. Untuk benda yang mempunyai emisivitas 1 dinamakan *benda hitam*, yaitu suatu benda yang mempunyai sifat menyerap semua kalor. Benda hitam diidentikkan dengan benda berongga yang memiliki lubang kecil. Apabila dilihat lubang itu berwarna hitam karena jika ada cahaya yang masuk ke lubang tersebut kemungkinan kecil bisa keluar lagi, cahaya itu akan dipantulkan oleh dinding bagian dalam benda berongga sehingga akhirnya energi habis

terserap. Sebaliknya jika benda tersebut dipanaskan, maka lubang itu akan menyala lebih terang dibandingkan dengan daerah sekitarnya, yang berarti memancarkan energi lebih besar dibandingkan dengan yang lain. Di sini diartikan bahwa *benda hitam adalah benda yang akan menyerap semua energi yang datang dan akan memancarkan energi dengan baik*. Benda yang mempunyai sifat menyerap semua energi yang mengenainya disebut benda hitam. Benda hitam jika dipanaskan akan memancarkan energi radiasi. Energi radiasi yang dipancarkan oleh benda hitam disebut *radiasi benda hitam*. Dalam hal ini benda hitam sebenarnya hanya suatu model untuk menggambarkan benda hitam sempurna yang kenyataannya benda itu tidak ada.

Contoh Soal

Tentukan energi radiasi yang dipancarkan oleh sebuah benda yang memiliki luas 400 cm^2 yang suhunya 127°C, jika diketahui emisivitas benda itu 0,5!

Penyelesaian :

Diketahui : $A = 400\ cm^2 = 4 \cdot 10^{-2}\ m^2$

$T = 127°C = 273 + 127\ K = 400\ K$

$e = 0,5$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}K^{-4}$

Ditanyakan : $W = ...?$

Jawab : $W = e\sigma AT^4$

$= 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot (400)^4$

$= 29,0304\ W/m^2$

Latihan Soal :

1. Hitung besarnya energi radiasi yang dipancarkan oleh benda yang luasnya 100 cm^2 pada suhu 1000 K, jika diketahui $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W/m^2K^4$ dan $e = 0,5$!
2. Suatu benda hitam sempurna memiliki luas 10 cm^2 memancarkan daya radiasi sebesar 80,72 watt. Tentukan berapa K suhu benda tersebut! ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}\ W\ m^{-2}K^4$)

1. Hukum Pergeseran Wien

Jika sebuah benda hitam dipanaskan, maka benda itu suhunya akan naik dan warnanya akan berubah dari merah tua bergeser ke arah sinar putih. Pergeseran warna benda tersebut menunjukkan bahwa pancaran energi radiasi semakin

tinggi suhunya semakin besar frekuensi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan benda tersebut dan semakin lengkap gelombang elektromagnetik yang dipancarkan. Spektrum radiasi benda hitam (**lihat Gambar 7.2**) merupakan gambaran dari gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh benda hitam. Seorang fisikawan dari bangsa Jerman, berhasil menemukan suatu hubungan empiris sederhana bahwa radiasi benda hitam selalu terdapat panjang gelombang yang membawa energi paling besar (intensitas maksimum), dan panjang gelombang yang membawa intensitas paling besar (maksimum) selalu bergeser terus ke arah panjang gelombang lebih kecil ketika suhu benda tersebut bertambah. Pernyataan ini dikenal dengan *hukum pergeseran Wien* yang dirumuskan:

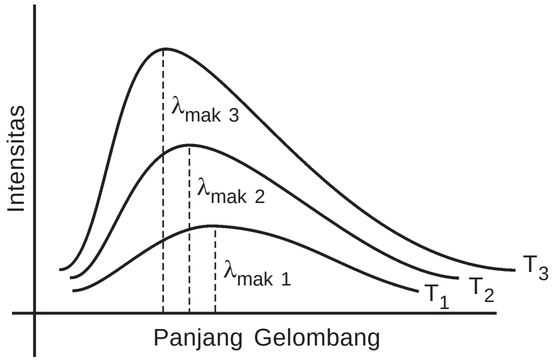
$$\lambda_{max} \cdot T = C \qquad \text{.... (7.2)}$$

dengan

λ_{max} = panjang gelombang yang membawa energi maksimum

T = suhu benda (K)

C = konstanta Wien = $2{,}898 \times 10^{-3}$ mK



Gambar 7.2 *Pergeseran Wien untuk Spektrum radiasi benda hitam.*

Contoh Soal

Suatu benda memancarkan radiasi pada suhu 727°C. Tentukan berapa panjang gelombang yang membawa energi radiasi maksimum?
(C = $2{,}898 \cdot 10^{-3}$ mK)

Penyelesaian :

Diketahui : T = 727°C = 727 + 273 K = 1000 K

C = $2{,}898 \times 10^{-3}$ mK

Ditanyakan : λ = ...?

Jawab : $\lambda \cdot T = C$

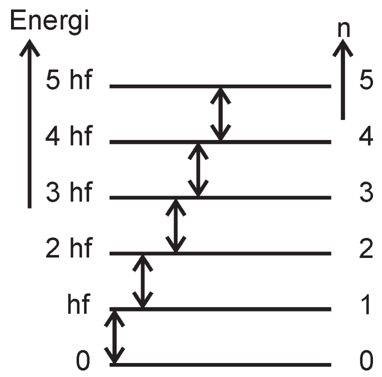
$$\lambda = \frac{C}{T} = \frac{2{,}898 \cdot 10^{-3}}{1000} = 2{,}898 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Soal Latihan :

1. Sebuah filamen lampu pijar menyala pada suhu 1.227°C, tentukan berapa panjang gelombang yang membawa energi radiasi maksimumnya?
2. Intensitas radiasi maksimum dari spektrum cahaya matahari terjadi pada panjang gelombang 475 nm. Berapakah suhu permukaan matahari ? (C = $2{,}90.10^{-3}$ mK)

2. Teori Klasik dan Teori Kuantum Planck

Beberapa teori yang mencoba untuk menjelaskan tentang radiasi benda hitam, yaitu teori yang dikemukaan oleh **Wilhelm Wien** dan teori yang dikemukakan oleh **Lord Rayleigh** serta **James Jeans** pada akhir abad 19 yang menerangkan radiasi benda hitam mengunakan teori gelombang klasik. Hal tersebut dikarenakan pada saat itu telah mengenal bahwa energi radiasi benda hitam diperoleh dari energi getaran atom yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Akan tetapi pada saat itu mengganggap bahwa energi yang dipancarkan secara kontinu. Teori yang dikemukakan Wien hanya cocok untuk menjelaskan radiasi benda hitam pada daerah panjang gelombang pendek, tetapi tidak cocok untuk daerah panjang gelombang panjang. Sebaliknya teori Rayleigh – Jeans ternyata dapat menjelaskan radiasi benda hitam pada daerah panjang gelombang panjang tetapi gagal untuk menjelaskan pada panjang gelombang pendek.



Gambar 7.3 *Tingkat-tingkat energi atom*

Akhirnya penjelasan yang dikemukakan oleh **Max Planck** yang sesuai dengan hasil spektrum radiasi benda hitam. Pada akhir tahun 1900 Max Planck mengemukakan pendapatnya yang sangat radikal karena apa yang dikemukakan Planck sangat bertentangan dengan pendapat saat itu. Menurut Max Planck bahwa energi radiasi benda hitam dipancarkan tidak secara kontinu tetapi secara *diskontinu, yaitu pancaran radiasi benda hitam dipancarkan dalam bentuk paket-paket energi yang disebut kuanta atau kemudian lebih dikenal dengan sebutan foton.*

Selanjutnya Max Planck mengemukakan rumus emperisnya untuk mendukung pendapatnya dengan mengemukakan asumsi yang menyatakan bahwa :

a. Energi radiasi yang dipancarkan oleh getaran atom-atom benda hitam berbentuk diskret (diskontinu) yaitu berupa paket energi yang besarnya :

$$E = n\,h\,f \qquad \text{.... (7.3)}$$

Dengan n adalah bilangan kuantum dan f adalah frekuensi getaran atom, dan h adalah konstanta Planck yang besarnya 6,625 x 10^{-34} Joule sekon. Karena energinya diskret maka dikatakan energinya *terkuantisasi* atau *tereksitasi*, di mana energi yang boleh diperkenankan adalah untuk n = 1, 2, 3, ... yang kemudian dikenal sebagai *tingkat-tingkat energi atom*.

b. Molekul-molekul atau atom-atom akan memancarkan atau menyerap energi dalam bentuk paket-paket energi (diskret) yang disebut *kuantum* atau *foton*. Setiap foton memiliki energi sebesar hf. Jika suatu atom menyerap 1 foton, energinya bertambah sebesar hf dan sebaliknya jika memancarkan satu foton energinya akan berkurang sebesar hf. **Gambar (7.3)** menggambarkan tingkat-tingkat energi atom atau molekul. Gagasan Max Planck baru menyangkut permukaan benda hitam saja. Kemudian *Albert Einstein* memperluasnya menjadi lebih luas yang dengan menggunakan *teori kuantum, bahwa cahaya merupakan pancaran paket-paket energi yang disebut foton.*

Teori-teori yang dikemukakan sebelum tahun 1900 sering disebut dengan *fisika klasik*, sedang teori setelah tahun 1900 yang dengan diawali teori kuantum Planck ini disebut *fisika modern*.

Contoh Soal

Hitunglah energi foton dari gelombang cahaya yang memiliki frekuensi 5.10^{14} Hz (h = $6{,}62.10^{-34}$ Js , 1 eV = 1,6 .10^{-19} Joule dan 1 Joule = eV)

Penyelesaian :

Diketahui : $h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ Js

$f = 5 \times 10^{14}$ Hz

Ditanyakan : E = ...?

Jawab : $E = hf = 6{,}62 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^{14}$

$= 33{,}1 \times 10^{-19}$ Joule

atau $E = \dfrac{33{,}1 \times 10^{-19}}{1{,}6 \times 10^{-19}}\ e\text{V} = 20{,}69\ e\text{V}$

Soal Latihan :

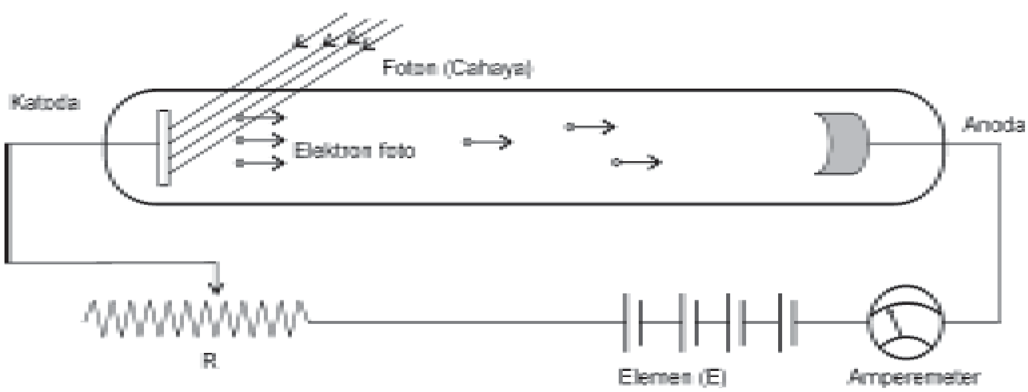
1. Hitung berapa panjang gelombang foton yang memiliki energi sebesar 2,75 eV. (Jika digunakan h = $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js dan c = 3.10^{8} m/s).
2. Hitung energi foton yang memiliki panjang gelombang 6,0 nm! (h = $6,62.10^{-34}$ Js dan c = 3.10^{8} m/s).
3. Hitung panjang gelombang foton yang memiliki energi sebesar 3.10^{-19} joule! Jika h = $6,62.10^{-34}$ Js dan c = 3.10^{8} m/s.

Life Skills : Kecakapan Sosial

Apabila di siang hari yang cuacanya cukup cerah, badan kita akan merasakan lebih panas jika memakai baju hitam dibandingkan dengan memakai baju putih. Demikian pula bila kita berdiri di dekat tungku yang berwarna hitam akan terasa lebih panas dibandingkan dengan tungku yang berwarna putih. Jelaskan mengapa bisa demikian coba diskusikan dengan temanmu!

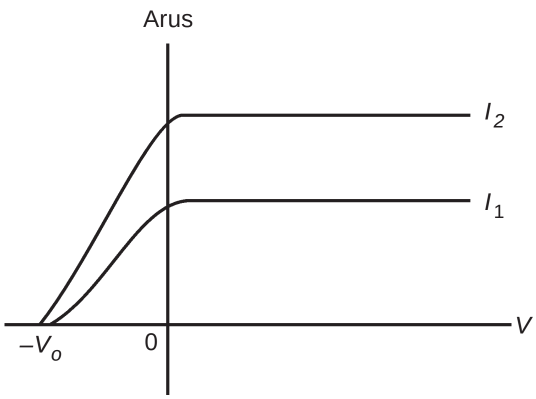
B. Efek Fotolistrik

Untuk menguji teori kuantum yang dikemukakan oleh Max Planck, kemudian *Albert Einstein* mengadakan suatu penelitian yang bertujuan untuk menyelidiki bahwa cahaya merupakan pancaran paket-paket energi yang kemudian disebut *foton* yang memiliki energi sebesar *hf*. Percobaan yang dilakukan Einstein lebih dikenal dengan sebutan *efek fotolistrik*. Peristiwa efek fotolistrik yaitu terlepasnya elektron dari permukaan logam karena logam tersebut disinari cahaya.



Gambar 7.4 *Skema alat untuk menyelidiki efek fotolistrik*

Gambar (7.4) menggambarkan skema alat yang digunakan Einstein untuk mengadakan percobaan. Alat tersebut terdiri atas tabung hampa udara yang dilengkapi dengan dua elektroda A dan B dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus searah (DC). Pada saat alat tersebut dibawa ke dalam ruang gelap, maka amperemeter tidak menunjukkan adanya arus listrik. Akan tetapi pada saat permukaan Katoda (A) dijatuhkan sinar amperemeter menunjukkan adanya arus listrik. Hal ini menunjukkan adanya aliran arus listrik. Aliran arus ini terjadi karena adanya elektron yang terlepas dari permukaan (yang selanjutnya disebut *elektron foto*) A bergerak menuju B. Apabila tegangan baterai diperkecil sedikit demi sedikit, ternyata arus listrik juga semakin mengecil dan jika tegangan terus diperkecil sampai nilainya negatif, ternyata pada saat tegangan mencapai nilai tertentu ($-V_o$), amperemeter menunjuk angka nol yang berarti tidak ada arus listrik yang mengalir atau tidak ada elektron yang keluar dari keping A. Potensial V_o ini disebut *potensial henti*, yang nilainya tidak tergantung pada intensitas cahaya yang dijatuhkan. Hal ini menunjukkan bahwa energi kinetik maksimum elektron yang keluar dari permukaan adalah sebesar:



Gambar 7.5 *Grafik hubungan antara intensitas dengan potensial henti*

$$Ek = \frac{1}{2} mv^2 = e\,Vo \qquad \text{.... (7.4)}$$

dengan :

Ek = energi kinetik elektron foto (J atau eV)

m = massa elektron (kg)

v = kecepatan elektron (m/s)

e = muatan elektron (C)

Vo = potensial henti (volt)

Berdasarkan hasil percobaan ini ternyata tidak semua cahaya (foton) yang dijatuhkan pada keping akan menimbulkan efek fotolistrik. Efek fotolistrik akan timbul jika frekuensinya lebih besar dari frekuensi tertentu. Demikian juga frekuensi minimal yang mampu menimbulkan efek fotolistrik tergantung pada jenis logam yang dipakai.

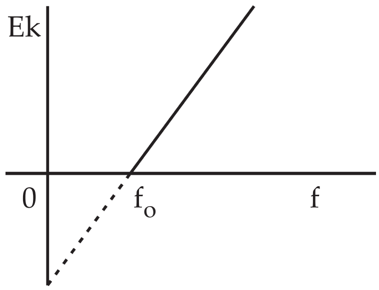
Selanjutnya, marilah kita pelajari bagaimana pandangan teori gelombang dan teori kuantum (foton) untuk menjelaskan peristiwa efek fotolistrik ini. Dalam teori gelombang ada dua besaran yang sangat penting, yaitu *frekuensi (panjang gelombang)* dan *intensitas*.

Ternyata teori gelombang gagal menjelaskan tentang sifat-sifat penting yang terjadi pada efek fotolistrik, antara lain :

a. Menurut teori gelombang, energi kinetik elektron foto harus bertambah besar jika intensitas foton diperbesar. Akan tetapi kenyataan menunjukkan bahwa energi kinetik elektron foto tidak tergantung pada intensitas foton yang dijatuhkan.
b. Menurut teori gelombang, efek fotolistrik dapat terjadi pada sembarang frekuensi, asal intensitasnya memenuhi. Akan tetapi kenyataannya efek fotolistrik baru akan terjadi jika frekuensi melebihi harga tertentu dan untuk logam tertentu dibutuhkan frekuensi minimal yang tertentu agar dapat timbul elektron foto.
c. Menurut teori gelombang diperlukan waktu yang cukup untuk melepaskan elektron dari permukaan logam. Akan tetapi kenyataannya elektron terlepas dari permukaan logam dalam waktu singkat (spontan) dalam waktu kurang 10^{-9} sekon setelah waktu penyinaran.
d. Teori gelombang tidak dapat menjelaskan mengapa energi kinetik maksimum elektron foto bertambah jika frekuensi foton yang dijatuhkan diperbesar.

Teori kuantum mampu menjelaskan peristiwa ini karena menurut teori kuantum bahwa foton memiliki energi yang sama, yaitu sebesar hf, sehingga menaikkan intensitas foton berarti hanya menambah banyaknya foton, tidak menambah energi foton selama frekuensi foton tetap.

Menurut Einstein energi yang dibawa foton adalah dalam bentuk paket, sehingga energi ini jika diberikan pada elektron akan diberikan seluruhnya, sehingga foton tersebut lenyap. Oleh karena elektron terikat pada energi ikat tertentu, maka diperlukan energi minimal sebesar energi ikat elektron tersebut. Besarnya energi minimal yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari energi ikatnya disebut *fungsi kerja* (W_0) atau *energi ambang*. Besarnya W_0 tergantung pada jenis logam yang digunakan. Apabila energi foton yang diberikan pada elektron lebih besar dari fungsi kerjanya, maka kelebihan energi tersebut akan berubah menjadi energi kinetik elektron. Akan tetapi jika energi foton lebih kecil dari energi ambangnya ($hf < W_0$) tidak akan menyebabkan elektron foto. Frekuensi foton terkecil yang mampu menimbulkan elektron foto disebut frekuensi ambang. Sebaliknya panjang gelombang terbesar yang mampu menimbulkan elektron foto disebut *panjang gelombang ambang*. Sehingga hubungan antara energi foton, fungsi kerja dan energi kinetik elektron foto dapat dinyatakan dalam persamaan :



***Gambar 7.6** Grafik hubungan antara Ek dengan f*

$E = W_o + Ek$ atau $Ek = E - W_o$ sehingga

$$Ek = hf - hfo = h\,(f - fo) \qquad \text{.... (7.5)}$$

dengan :

Ek = energi kinetik maksimum elektron foto

h = konstanta Planck

f = frekuensi foton

fo = frekuensi ambang

Contoh Soal

Sebuah logam mempunyai frekuensi ambang 4 x 10^{14} Hz. Jika logam tersebut dijatuhi foton ternyata elektron foto yang dari permukaan logam memiliki energi kinetik maksimum sebesar 19,86 × 10^{-20} Joule. Hitunglah frekuensi foton tersebut!

(h = 6,62 × 10^{-34} Js)

Penyelesaian :

Diketahui : $f_o = 4 \times 10^{14}$ Hz

$Ek = 19{,}86 \times 10^{-20}$ J

$h = 6{,}62 \times 10^{-34}$ Js

Ditanyakan : f = ...?

Jawab : $W_o = hf_o$

$= 6{,}62 \times 10^{-34} \times 4 \times 10^{14}$ J

$= 26{,}48 \times 10^{-20}$ J

$E = Ek + W_o$

$= hf$

$$f = \frac{Ek + Wo}{h}$$

$$= \frac{19{,}86 \times 10^{-20} + 26{,}48 \times 10^{-20}}{6{,}62 \times 10^{-34}}$$

$$= \frac{46{,}32 \times 10^{-20}}{6{,}62 \times 10^{-34}} = 7 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Jadi frekuensi foton sebesar 7 × 10^{14} Hz

Soal Latihan :

1. Frekuensi ambang suatu logam adalah 6.10^{14} Hz, jika logam tersebut disinari cahaya dengan gelombang yang frekuensinya 10^{15} Hz. Hitunglah energi kinetik elektron foto yang terlepas dari permukaan logam tersebut!

   ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js)
2. Sebuah elektron baru akan terlepas dari permukaan logam jika disinari cahaya dengan panjang gelombang 5000 Å. Tentukan : ($h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js dan $c = 3 \times 10^{8}$ m/s)
   a. fungsi kerja logam tersebut. ($W_o = 3,972 \times 10^{-19}$ J)
   b. energi kinetik elektron foto yang terlepas jika disinari cahaya dengan frekuensi 8×10^{14} Hz! ($E_k = 1,324 \times 10^{-19}$ J)
3. Bila diketahui fungsi kerja sebuah logam 2,1 eV. Jika foton dengan panjang gelombang 5×10^{-7} m dijatuhkan ke permukaan logam tersebut, tentukan berapa kecepatan maksimum elektron yang terlepas! (massa elektron (m) = $9,1 \times 10^{-31}$ kg, muatan elektron (e) = $1,6 \times 10^{-19}$ C, dan $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js)

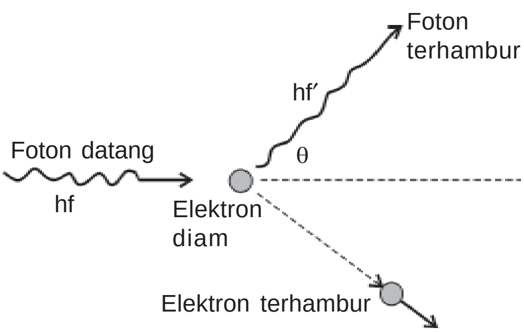
Wawasan Produktivitas : Etos Kerja

Peristiwa yang sangat menarik dalam radiasi benda hitam yaitu saat Einstein mengemukakan terjadinya efek fotolistrik, yang membuktikan bahwa cahaya merupakan pancaran paket-paket energi yang disebut foton. Salah satu contoh penerapan terjadinya efek fotolistrik yaitu pada alat fluksmeter yaitu suatu alat yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya dalam suatu ruangan. Cobalah terangkan bagaimana prinsip kerja dari fluksmeter tersebut lengkap dengan skema gambar rangkaiannya? (Carilah informasi dari internet atau sumber-sumber referensi yang lain mendukung).

C. Efek Compton

Menurut teori kuantum cahaya, foton berlaku sebagai partikel, hanya foton tidak memiliki massa diam. Jika pendapat ini benar, maka berdasarkan peristiwa efek fotolistrik yang dikemukakan oleh Einstein, **Arthur Holy Compton** pada tahun 1923 telah mengamati gejala-gejala tumbukan antara foton yang berasal dari sinar X dengan elektron. Compton mengamati hamburan foton dari sinar X oleh elektron dapat diterangkan dengan menganggap bahwa foton seperti partikel dengan energi *hf* dan momentum *hf/c* cocok seperti

yang diusulkan oleh Einstein. Percobaan Compton cukup sederhana yaitu sinar X monokromatik (sinar X yang memiliki panjang gelombang tunggal) dikenakan pada keping tipis berilium sebagai sasarannya. Kemudian untuk mengamati foton dari sinar X dan elektron yang terhambur dipasang detektor. Sinar X yang telah menumbuk elektron akan kehilangan sebagian energinya yang kemudian terhambur dengan sudut hamburan sebesar θ terhadap arah semula. Berdasarkan hasil pengamatan ternyata sinar X yang terhambur memiliki panjang gelombang yang lebih besar dari panjang gelombang sinar X semula. Hal ini dikarenakan sebagian energinya terserap oleh elektron. Jika energi foton sinar X mula-mula *hf* dan energi foton sinar X yang terhambur menjadi (*hf* – *hf'*) dalam hal ini f > f', sedangkan panjang gelombang yang terhambur menjadi tambah besar yaitu λ > λ'.



Gambar 7.7 *Skema percobaan Compton untuk menyelidiki tumbukan foton dan elektron*

Dengan menggunakan hukum kekekalan momentum dan kekekalan energi Compton berhasil menunjukkan bahwa perubahan panjang gelombang foton terhambur dengan panjang gelombang semula, yang memenuhi persamaan :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\theta) \quad \text{.... (7.6)}$$

dengan

λ = panjang gelombang sinar X sebelum tumbukan (m)
λ' = panjang gelombang sinar X setelah tumbukan (m)
h = konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js)
m_o = massa diam elektron ($9,1 \times 10^{-31}$ kg)
c = kecepatan cahaya (3×10^{8} ms^{-1})
θ = sudut hamburan sinar X terhadap arah semula (derajat atau radian)

Besaran $\frac{h}{m_o c}$ sering disebut dengan *panjang gelombang Compton*. Jadi jelaslah sudah bahwa dengan hasil pengamatan Compton tentang hamburan foton dari sinar X menunjukkan bahwa foton dapat dipandang sebagai partikel, sehingga memperkuat teori kuantum yang mengatakan bahwa cahaya mempunyai dua sifat, yaitu *cahaya dapat sebagai gelombang* dan *cahaya dapat bersifat sebagai partikel* yang sering disebut sebagai *dualime gelombang cahaya*.

Contoh Soal

Pada percobaan efek Compton seberkas sinar X dengan frekuensi 3.10^{19} Hz ditembakkan pada elektron diam. Pada saat menumbuk elektron terhambur dengan sudut 60°. Bila diketahui $m_o = 9,1.10^{-31}$ kg, $h = 6,62.10^{-34}$ Js, dan $c = 3.10^8$ m/s, hitunglah frekuensi sinar X yang terhambur!

Penyelesaian

Diketahui : $f = 3 \times 10^{19}$ Hz

$\theta = 60°$

$m_o = 9,1 \times 10^{-31}$ kg

$h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js

$c = 3 \times 10^8$ m/s

Ditanyakan : $f' = \ldots\ldots ?$

Jawab :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\theta)$$

$$= \frac{6,62 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 10^8}(1 - \cos 60°)$$

$$= \frac{6,62 \times 10^{-34}}{27,3 \times 10^{-23}}(1 - 0,5)$$

$$= \frac{3,31 \times 10^{-34}}{27,3 \times 10^{-23}}$$

$$= 0,1212 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^{19}}$$

$$= 1 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$\lambda' = \lambda + 0,1212 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$= 1 \times 10^{-11} + 0,1212 \times 10^{-11} \text{ m}$$

$$= 1,1212 \text{ x } 10^{-11} \text{ m}$$

$$f' = \frac{c}{\lambda'}$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{1,1212 \times 10^{-11}}$$

$$= 2,676 \times 10^{19} \text{ Hz}$$

Jadi, frekuensi sinar X yang terhambur sebesar $2,676 \times 10^{19}$ Hz.

Soal Latihan :

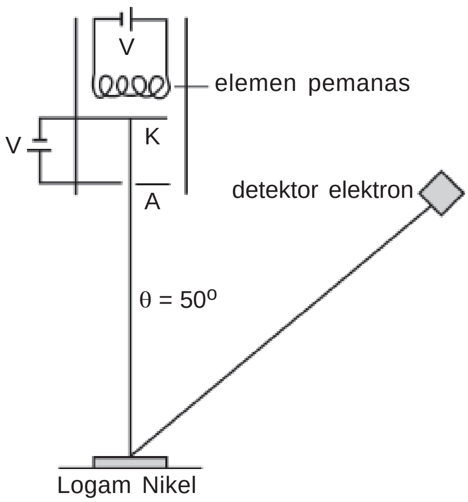
Pada percobaan Compton seberkas sinar X dengan panjang gelombang 0,6 nm menumbuk sasaran elektron dalam atom karbon, apabila sinar X dihamburkan membentuk sudut 90^{o} terhadap arah semula. Hitunglah panjang gelombang sinar X yang terhambur!

Wawasan Produktivitas : Inovatif dan Kreatif

Pada percobaan efek Compton yang mengamati hamburan sinar X setelah menumbuk elektron diam, merupakan bukti bahwa cahaya dapat berkelakuan sebagai partikel. Tetapi mengapa efek Compton tidak tampak pada gelombang dalam daerah cahaya tampak! Coba jelaskan bagaimana pendapatmu!

D. Sifat Gelombang dari Partikel

Berdasarkan peristiwa efek fotolistrik dari Einstein, yang kemudian didukung dengan percobaan yang dilakukan oleh Compton telah membuktikan tentang dualisme (sifat kembar) cahaya, yaitu cahaya bisa berkelakuan sebagai gelombang, tetapi cahaya juga dapat bersifat partikel. Pada tahun 1924 **Louise de Broglie** mengemukakan pendapatnya bahwa *cahaya dapat berkelakuan seperti partikel, maka partikel pun seperti halnya elektron dapat berkelakuan seperti gelombang*. Sebuah foton dengan frekuensi f memiliki energi sebesar hf dan memiliki momentum $p = \frac{hf}{c}$, karena $c = f\lambda$, maka momentum foton dapat dinyatakan $p = \frac{h}{\lambda}$ sehingga panjang gelombang foton dapat dinyatakan $\lambda = \frac{h}{p}$. Untuk benda yang bermassa m bergerak dengan kecepatan memilki momentum linier sebesar mv maka *panjang gelombang de Broglie* dari benda itu dinyatakan dengan persamaan :



Gambar 7.8 *Skema percobaan Louise de Broglie*

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad .... (7.7)$$

Untuk menguji hipotesis yang dilakukan oleh Louise de Broglie pada tahun 1927, **Davisson** dan **Germer** di Amerika Serikat dan **G.P. Thomson** di Inggris secara bebas meyakinkan hipotesis Louise de Broglie dengan menunjukkan berkas elektron yang terdifraksi bila berkas ini terhambur oleh kisi atom yang teratur dari suatu kristal. Davisson dan Germer melakukan suatu eksperimen dengan menembakkan elektron berenergi rendah yang telah diketahui tingkat energinya kemudian ditembakkan pada atom dari nikel yang diletakkan dalam ruang hampa. Berdasarkan hasil pengamatan Davisson dan Germer terhadap elektron-elektron yang terhambur ternyata dapat menunjukkan adanya gejala interferensi dan difraksi. Dengan demikian hipotesis de Broglie yang menyatakan partikel dapat berkelakuan sebagai gelombang adalah benar.

Contoh Soal

Berapakah panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang bergerak dengan kelajuan 2×10^5 m/s jika massa elaktron $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js?

Penyelesaian :

Diketahui : $v = 2 \times 10^5$ m/s

$m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg

$h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js

Ditanyakan : $\lambda = ...?$

Jawab : $\lambda = \frac{h}{mv}$

$$= \frac{6,6 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 2 \times 10^5}$$

$$= \frac{6,6 \times 10^{-34}}{18,2 \times 10^{-26}}$$

$= 3,63 \times 10^{-10}$ m

$= 3,63$ Å

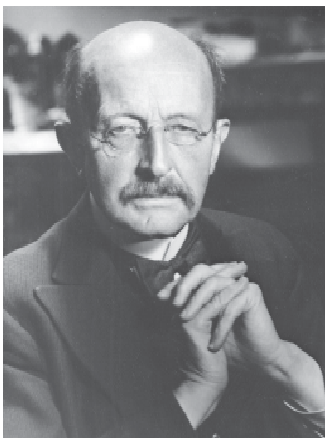
Soal Latihan :

1. Dari keadaan diam elektron dipercepat dengan beda potensial sebesar 100 Volt. Berapakah panjang gelombang de Broglienya?
2. Berapakah panjang gelombang yang harus dimiliki radiasi gelombang elektromagnetik jika sebuah foton dalam berkas itu memiliki momentum yang sama dengan momentum elektron yang bergerak dengan kecepatan 5.10^6 m/s?

Keingintahuan : Rasa Ingin Tahu

Dari hasil percobaan tentang efek fotolistrik, efek Compton dan difraksi elektron menunjukkan adanya dualisme sifat cahaya yaitu cahaya dapat bersifat sebagai gelombang dan di sisi lain cahaya dapat bersifat partikel. Apakah sifat dualisme gelombang cahaya tersebut dapat ditunjukkan dalam waktu yang bersamaan? Jelaskan bagaimana pendapatmu!

Seputar Tokoh



Max Planck (1858 -1947)

Dilahirkan di Kiel dan belajar di Munich dan Berlin. Pada tahun 1900 ia mengemukakan pendapatnya bahwa kunci pemahamam radiasi benda hitam adalah anggapan bahwa pemancaran dan penyerapan radiasi terjadi dalam bentuk kuantum energi *hf*. Penemuan ini menghasilkan hadiah Nobel dalam tahun 1918. Dari penemuan Max Planck tentang penyerapan dan pemancaran radiasi benda hitam dalam kuantum (paket-paket) energi sebesar *hf* inilah yang dianggap sebagai awal dari fisika modern. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Menurut Max Planck pemancaran dan penyerapan energi radiasi pada benda hitam dinyatakan sebagai paket-paket energi atau kuantum yang disebut foton, setiap foton membawa energi sebesar *hf*.
2. Besarnya energi radiasi benda hitam oleh Stefan–Boltmanz dinyatakan dalam persamaan :

   $W = e\sigma AT^4$
3. Peristiwa keluarnya elektron dari permukaan logam karena disinari dengan cahaya atau foton disebut efek fotolistrik, elektron yang terlepas disebut elektron foto. Besarnya energi kinetik maksimum elektron foto tidak tergantung pada intensitas cahaya yang dijatuhkan tetapi tergantung pada frekuensi foton (cahaya).
4. Frekuensi ambang yaitu frekuensi foton terendah yang mampu menimbulkan efek fotolistrik. (f_0).
5. Fungsi kerja (energi ambang) yaitu energi terendah dari foton agar mampu menimbulkan efek fotolistrik (W_0).
6. Besarnya energi kinetik maksimum elektron foto dinyatakan dalam persamaan :

   $Ek = E - W_0$ atau $Ek = h\,(f - f_0)$
7. Foton dapat berkelakuan sebagai partikel. Ciri sebagai partikel yaitu mempunyai momentum untuk membuktikan foton berkelakuan sebagai partikel, maka Afthur Compton melakukan percobaan yang lebih dikenal dengan sebutan efek Compton. Panjang gelombang sinar X setelah menumbuk elektron sebagai sasaran target panjang gelombangnya menjadi lebih besar sebagai akibat kehilangan sebagian energinya. Pada saat menumbuk elektron, besarnya perubahan panjang gelombang dinyatakan dalam persamaan :

   $$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)$$
8. Kalau foton dapat berkelakuan seperti partikel, maka Louise de Broglie mengusulkan bahwa partikel pun dapat bersifat sebagai gelombang dengan panjang gelombang yang diusulkan oleh de Broglie yaitu :

   $$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$
9. Kebenaran dari dugaan Louise de Broglie dibuktikan oleh Davisson dan Germer dengan mengamati gejala interferensi dan difraksi elektron yang ditembakkan pada atom nikel.

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Besarnya perbandingan energi radiasi yang dipancarkan oleh benda yang sama pada suhu 127°C dan suhu 527°C adalah ....
   A. 1 : 2
   B. 1 : 4
   C. 1 : 8
   D. 1 : 10
   E. 1 : 16

2. Energi radiasi yang diserap atau dipancarkan oleh sebuah benda dinyatakan dalam bentuk paket-paket energi yang disebut foton, pernyataan ini pertama kali dikemukakan oleh ....
   A. Albert Einsteins
   B. Wilhelm Wien
   C. Max Planck
   D. Afthur Compton
   E. Louise de Broglie

3. Suatu benda yang luasnya 20 cm^2, suhunya 1000 K memancarkan daya radiasi sebesar 68,04 Watt m^{-2}, maka besarnya emisivitas permukaan benda tersebut adalah ....
   A. 0,2
   B. 0,4
   C. 0,5
   D. 0,6
   E. 0,8

4. Frekuensi ambang suatu logam $1,5 \times 10^{16}$ Hz. Apabila logam tersebut disinari dengan cahaya yang mempunyai frekuensi 2×10^{16} Hz dan $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js, 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J maka besarnya energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam tersebut adalah ....
   A. 41,2 eV
   B. 29,6 eV
   C. 13,6 eV
   D. 20,6 eV
   E. 5,2 eV

5. Dari efek Compton dapat diinterpretasikan bahwa ....
   A. cahaya bersifat sebagai partikel
   B. cahaya dapat dihamburkan
   C. elektron bersifat sebagai cahaya
   D. cahaya terdiri atas elektron-elektron
   E. cahaya bersifat sebagai gelombang

6. Energi kinetik elektron yang terlepas dari permukaan logam pada peristiwa efek fotolistrik akan semakin besar ....
   A. intensitas cahaya diperbesar
   B. intensitas cahaya diperkecil
   C. panjang gelombang cahaya diperbesar
   D. frekuensi cahaya diperbesar
   E. frekuensi cahaya diperkecil

7. Sebuah foton mempunyai panjang gelombang 6500 Å, maka energi foton tersebut adalah .... (h = 6,62 x 10^{-34} Js, e = 1,6 x 10^{-19} C dan c = 3 x 10^{8} m s^{-1})
   A. 0,191 eV
   B. 1,91 eV
   C. 19,1 eV
   D. 3,05 eV
   E. 0,305 eV

8. Pada percobaan efek Compton apabila perubahan panjang gelombang sinar X setelah menumbuk elektron dinyatakan $\frac{h}{2m_oc}$, maka besar sudut hamburan sinar X adalah ....
   A. 30°
   B. 60°
   C. 180°
   D. 150°
   E. 120°

9. Pada tabung sinar X bekerja pada beda potensial sebesar 60 kVolt, maka panjang gelombang dari sinar X tersebut adalah ....
   (e = 1,6 × 10^{-19} C, m = 9,1 × 10^{-31}kg, dan c = 3 × 10^{8} m/s)
   A. 5,02 × 10^{-9} m
   B. 5,02 × 10^{-10} m
   C. 5,02 × 10^{-11} m
   D. 5,02 × 10^{-12} m
   E. 5,02 × 10^{-8} m

10. Besarnya frekuensi ambang logam natrium adalah $4,4 \times 10^{14}$ Hz. Besarnya potensial penghenti logam tersebut saat disinari cahaya dengan panjang gelombang 4000 Å adalah ... volt.

A. 0,128
B. 1,28
C. 0,28
D. 2,80
E. 0,42

B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!

1. Deskripsikan dengan singkat mengenai :
   a. Benda hitam
   b. Efek fotolistrik
   c. Hukum pergeseran Wien
2. Terangkan dengan singkat bagaimana kegagalan teori gelombang (fisika klasik) dalam menjelaskan gejala efek fotolistrik?
3. Energi radiasi yang dipancarkan sebuah benda yang berpijar pada suhu 127°C adalah 60 W m^{-2}. Berapakah energi radiasi yang dipancarkan benda tersebut pada suhu 800 K?
4. Fungsi kerja logam natrium diketahui 2,3 eV. Berapakah panjang gelombang yang menimbulkan efek fotolistrik pada logam natrium tersebut?
5. Berapakah panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang bergerak dengan kecepatan 3.10^6 m s^{-1}?

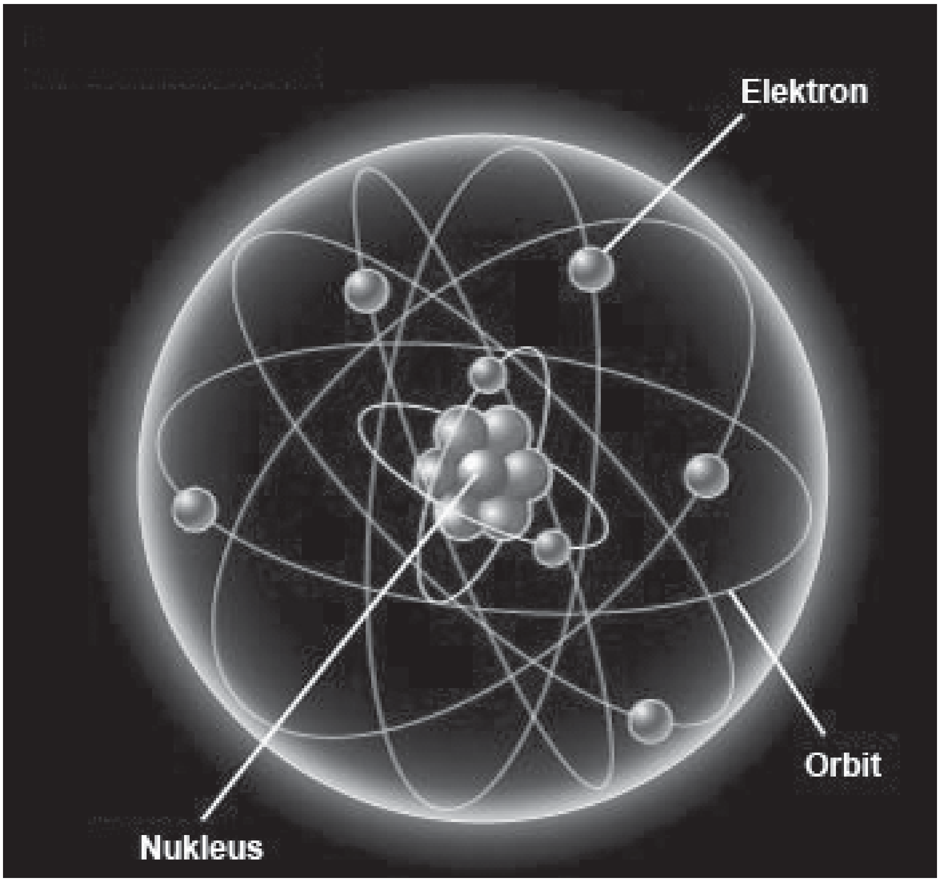
Refleksi

Setelah mempelajari materi bab ini, diharapkan kalian memahami tentang :

1. dualisme gelombang cahaya,
2. radiasi benda hitam,
3. efek Compton dan fotolistrik, dan
4. sifat gelombang dan partikel.

Apabila masih ada yang belum kalian pahami, pelajari kembali materi pada bab ini sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

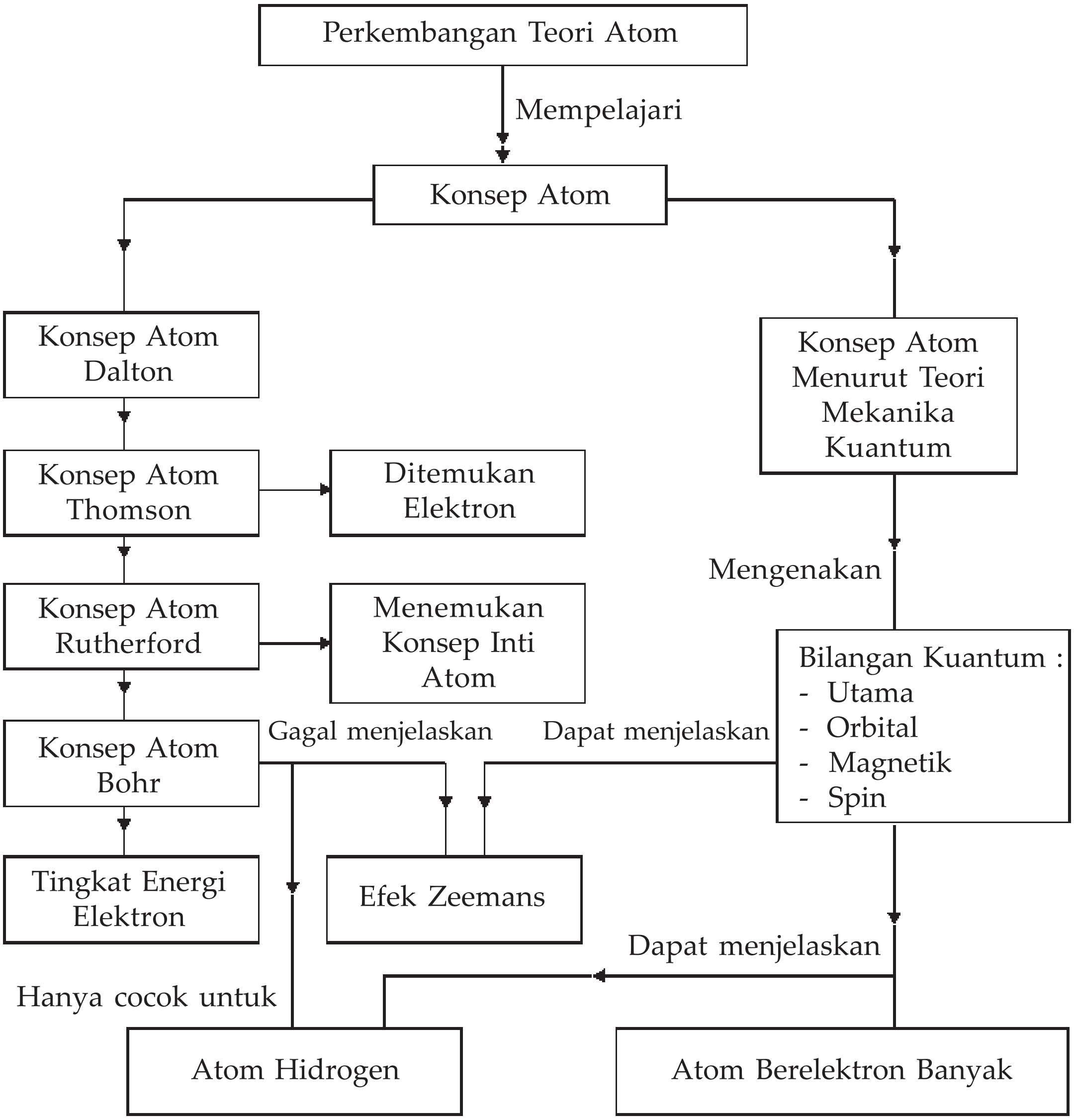
Bab VIII
Perkembangan Teori Atom



Sumber : www.scrience.howstuffworks.com

Atom pembentuk materi yang terdiri atas inti kecil yang dikelilingi elektron. Elektron mengelilingi inti pada orbit atau lintasannya.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu mendeskripsikan perkembangan teori atom.

Motivasi Belajar

Sejak awal tahun 1900-an para ilmuwan mengetahui bahwa atom pembentuk materi terdiri atas inti kecil yang dikelilingi oleh elektron. Inti itu ternyata terdiri atas partikel-partikel yang terlihat erat. Pada bab ini akan kita bahas perkembangan teori tentang atom yang didasarkan pada penemuan-penemuan yang telah dilakukan oleh para ahli Fisika. Untuk memahaminya, pelajari bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

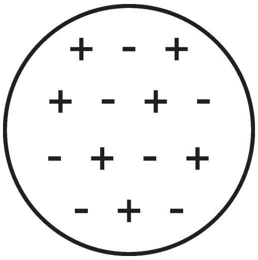
atom, neutron, Rutherferd, partikel alpha, beta, gama, proton, John Dalton, spektrum atom hidrogen, teori mekanika kuantum, elektron, J.J. Thomson, model atom Bohr, efek Zeeman

A. Model Atom Dalton

John Dalton (1766–1844), seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris dengan didukung dari hasil eksperimen-eksperimennya mengembangkan konsep atom dari *Demokritus* yang kemudian mengemukaan teori tentang atom. Secara garis besar teori atom Dalton dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Atom merupakan bagian terkecil dari suatu zat yang tidak bisa dibagi lagi.
2. Atom-atom penyusun zat tertentu memiliki sifat yang sama.
3. Atom unsur tertentu tidak bisa berubah menjadi atom unsur lain.
4. Dua atom atau lebih dapat bersenyawa (bereaksi) membentuk molekul.
5. Dalam reaksi kimia perbandingan antara atom-atom penyusunnya mempunyai perbandingan yang tertentu dan sederhana.
6. Dalam reaksi kimia pada dasarnya terjadi penyusunan kembali atom-atom penyusun zat.

B. Model Atom Thomson



Gambar 8.1 *Model atom Thomson*

Sehubungan dengan penemuan elektron yang menjadi bagian dari atom oleh **J.J. Thomson** pada tahun 1897, maka teori atom Dalton mulai goyah. Berdasarkan hasil penemuan elektron tersebut, maka Thomson mengajukan model atom untuk pertama kali (1904), yaitu sebagai berikut :

1. Atom bukan bagian terkecil dari zat.
2. Atom mempunyai muatan positif yang tersebar merata ke seluruh atom yang dinetralkan oleh elektron-elektron yang tersebar di antara muatan positif itu.
3. Massa elektron jauh lebih kecil dari massa atom.

Apabila digambarkan/divisualisasikan model atom yang dikemukakan Thomson ini seperti *model roti kismis* di mana bagian atom seperti halnya kismis yang menempel pada kue.

Model atom yang dikemukakan Thomson ini tidak dikembangkan lebih lanjut karena *tidak cocok* dengan hasil percobaan yang dilakukan oleh Ernest Rutherford (1871-1937) yang membuktikan bahwa muatan positif atom tidak tersebar merata di seluruh bagian atom tetapi terpusat pada bagian tengah atom yang kemudian disebut inti atom.

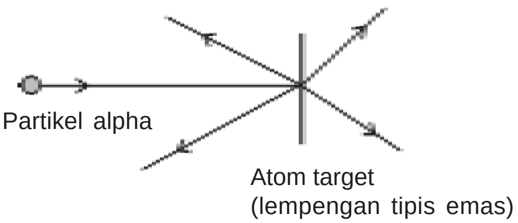
Keingintahuan : Mencari Informasi

Penemuan elektron pertama kali dikemukakan oleh J.J. Thomson pada saat mempelajari tentang sinar katode. Dari eksperimen tentang sinar katode yang dilakukan di dalam Laboratorium Cavendish di Cambridge, Inggris pada tahun 1897 inilah J.J. Thomson berhasil mengukur perbandingan antara muatan elektron dengan massa elektron (e/m), dengan mengamati penyimpangan sinar katode dalam gabungan medan listrik dan medan magnet. Dari hasil perhitungan yang mutakhir perbandingan e/m adalah $1,7588 \times 10^{11}$ C/kg. Sekarang menjadi tugas kalian, carilah informasi dari buku referensi atau dari internet tentang percobaan pengukuran muatan dan massa elektron (e/m) dari percobaan J.J. Thomson tersebut. Buatlah ringkasannya secara tertulis dan laporkan kepada guru fisika di kelasmu!

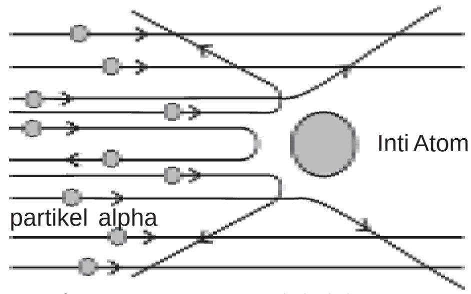
C. Model Atom Rutherford

Untuk menguji model atom J.J. Thomson, maka **Ernest Rutherford** mengadakan percobaan dengan menembak atom-atom dengan partikel-partikel alpha, yaitu partikel dengan massa empat kali massa atom hidrogen dan muatan

positif sebesar dua kali muatan elektron. Partikel alpha mempunyai daya tembus yang cukup kuat untuk melalui plat logam yang sangat tipis. Dalam percobaannya, Rutherford menembakkan partikel alpha dengan sasaran target lempengan tipis emas, seperti gambar di bawah ini :



Gambar 8.2 *Percobaan hamburan partikel-α oleh Rutherford*



Gambar 8.3 *Lintasan partikel alpha*

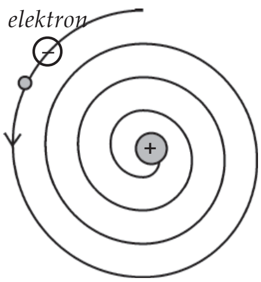
Berdasarkan hasil percobaan diharapkan semua partikel alpha menembus lurus lempengan emas, akan tetapi dalam hasil pengamatan diperoleh ada partikel alpha yang dibelokkan bahkan ada yang dibelokkan dengan sudut antara 90^o sampai 180^o. Hal terakhir yang tidak cocok dengan model atom Thomson.

Rutherford mengukur sudut-sudut hamburan partikel alpha dengan teliti. Bila muatan positif tidak menyebar, tetapi mengumpul pada suatu tempat dalam tiap-tiap atom, maka berdasarkan hukum Coulomb sudut penyimpangan akan berkisar antara 5^o sampai 150^o. Berarti gejala pemantulan kembali partikel alpha tersebut ditolak oleh suatu konsentrasi muatan positif dalam atom (terjadi gaya tolakan karena muatannya sejenis).

Berdasarkan hasil percobaannya ini kemudian Rutherford menyusun model atomnya yang secara garis besar adalah sebagai berikut :

1. Pada atom muatan positif dan sebagian besar massa atom terpusat pada suatu titik, yaitu di tengah-tengah atom yang kemudian disebut *inti atom*.
2. Sebagian besar ruangan dalam atom merupakan ruang kosong, yang ditunjukkan oleh banyaknya partikel alpa yang diteruskan dalam percobaan Rutherford.
3. Di luar inti pada jarak relatif jauh, elektron bergerak mengelilingi inti dalam lintasan-lintasan seperti planet-planet mengitari matahari dalam sistim tata surya.

Meskipun model atom Rutherford lebih baik dari model atom Thomson, tetapi model atom Rutherford memiliki kelemahan-kelemahan yaitu sebagai berikut.



Gambar 8.4 *Lintasan spiral elektron*

a. Model atom Rutherford tidak bisa menjelaskan tentang kestabilan atom. Berdasarkan hukum Coulomb antara elektron dan inti mengalami gaya Coulomb yang berfungsi sebagai gaya sentripetal sehingga mengalami percepatan. Menurut teori Maxwell percepatan muatan listrik akan memancarkan gelombang elektromagnetik, sehingga energi elektron total elektron (E) akan semakin berkurang dan jari-jari orbitnya akan semakin mengecil sehingga lintasan elektron berbentuk spiral yang menunjukkan ketidakstabilan inti atom.

b. Model atom Rutherford tidak mampu menjelaskan terjadinya spektrum garis yang merupakan ciri dari atom gas yang berpijar, yang seharusnya menurut teori atom Rutherford karena elektron memiliki gerakan spiral maka spektrum yang dihasilkan merupakan spektrum yang kontinu tetapi kenyataannya spektrum diskontinu.

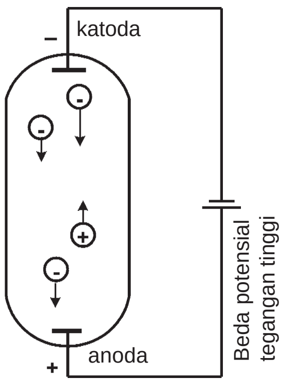
Life Skills : Kecakapan Personal

Meskipun perbandingan antara muatan dan massa elektron sudah ditemukan dari eksperimen J.J. Thomson, akan tetapi besarnya muatan elektron pada saat itu belum diketahui. Penemuan muatan elektron pertama kali dikemukakan oleh **Robert A Millikan** pada tahun 1909 dengan percobaannya yang lebih dikenal dengan nama **percobaan tetes minyak**. Dari hasil percobaan tetes minyak Millikan inilah berhasil dihitung muatan elektron adalah $e = 1{,}602192 \times 10^{-19}$ C (sering dibulatkan menjadi $1{,}6 \times 10^{-19}$ C) dan massa elektron $m = 9{,}109543 \times 10^{-31}$ kg (sering dibulatkan $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg).

Sekarang menjadi tugas kalian untuk mencari buku-buku referensi atau dari internet tentang percobaan tetes minyak Millikan tersebut! Buatlah ringkasannya secara tertulis dan laporkan kepada guru fisika di kelasmu!

D. Spektrum Atom Hidrogen

Apabila suatu zat dipanaskan secara terus-menerus, maka zat ini akan memancarkan cahaya dengan bentuk spektrum yang kontinu. Pemancaran radiasi cahaya pada zat ini disebabkan oleh getaran atom-atom penyusun zat.



Gambar 8.5 Tabung pelucutan gas

Akan tetapi jika suatu gas yang berada dalam tabung gas bertekanan rendah diberi beda potensial tinggi (Seperti **Gambar 8.5**) maka gas akan memancarkan spektrum (diskontinu), yang berarti gas hanya memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu.

Kita akan mempelajari spektrum yang dipancarkan oleh atom yang paling sederhana, yaitu hidrogen. Gas hidrogen ditempatkan pada tabung lucutan gas, jika tabung lucutan gas ini diberi tegangan tinggi sehingga terjadi lucutan muatan listrik. Gas hidrogen menjadi bercahaya dan memancarkan cahaya merah kebiru-biruan. Apabila diamati dengan *spektrograf* (alat untuk menyelidiki spektrum cahaya), pada pelat film terdapat garis cahaya, di mana satu garis cahaya menampilkan sebuah panjang gelombang yang dipancarkan cahaya dari sumber cahaya. Berdasarkan hasil pengamatan tentang spektrum atom hidrogen, Balmer menemukan empat spektrum garis pada cahaya tampak yaitu pada 410,2 nm, 434,1 nm, 486,2 nm, dan 656,3 nm yang ternyata cocok menggunakan perhitungan dengan rumus sebagai berikut :

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_A^{\,2}} - \frac{1}{n_B^{\,2}}\right) \qquad \text{.... (8.1)}$$

di mana untuk n_A = 2 dan n_B = 3, 4, dan 5

dengan :

λ = panjang gelombang yang dipancarkan

R = Konstanta Rydberg = 1,097 × 10^7 m^{-1}

Deret-deret spektrum garis yang memenuhi persamaan tersebut disebut *deret Balmer* yang terletak pada daerah cahaya tampak. Akan tetapi tidak hanya deret Balmer saja yang ditemukan dalam atom hidrogen, ada deret yang lainnya, yaitu *deret Lyman* (spektrum pada daerah sinar ultraviolet), *Paschen* (spektrum pada daerah sinar infra merah I), *Brackett* (spektrum pada daerah sinar infra merah II) dan *Pfund* (spektrum yang terletak pada daerah sinar infra merah III). Kelima deret tersebut dapat ditampilkan dengan rumus-rumus sederhana sebagai berikut :

1. Deret Lyman : untuk n_A = 1 dan n_B = 2, 3, 4, 5, 6 … dst
2. Deret Balmer : untuk n_A = 2 dan n_B = 3, 4, 5, 6 … dst
3. Deret Paschen : untuk n_A = 3 dan n_B = 4, 5, 6, 7 … dst
4. Deret Braket : untuk n_A = 4 dan n_B = 5, 6, 7, 8, … dst
5. Deret Pfund : untuk n_A = 5 dan n_B = 6, 7, 8 … dst

E. Model Atom Bohr

Model atom Rutherford gagal menjelaskan tentang kestabilan atom dan terjadinya spektrum garis atom hidrogen. Seorang ilmuwan Fisika dari Denmark, **Niels Bohr** dapat menjelaskan spektrum garis atom hidrogren. Bohr mengemukakan teori atomnya untuk menutupi kelemahan atom Rutherford dengan mengemukakan tiga postulatnya yaitu :

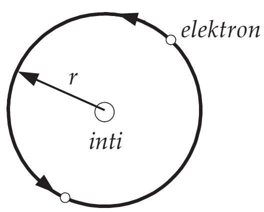
a. Elektron berotasi mengelilingi inti tidak pada sembarang lintasan, tetapi pada lintasan-lintasan tertentu tanpa membebaskan energi. Lintasan ini disebut *lintasan stasioner* dan memiliki energi tertentu.

b. Elektron dapat berpindah dari lintasan yang satu ke lintasan yang lain. Jika elektron pindah dari lintasan berenergi rendah (lintasan dalam) ke lintasan berenergi tinggi (lintasan luar) akan menyerap energi dan sebaliknya akan memancarkan energi. Energi yang dipancarkan atau diserap elektron sebesar hf.

c. Lintasan-lintasan yang diperkenankan elektron adalah lintasan-lintasan yang mempunyai momentum sudut kelipatan bulat dari $\frac{h}{2\pi}$.

F. Tingkat Energi Elektron

Elektron hanya dapat berputar mengelilingi inti pada lintasan tertentu dengan tingkat energi yang tertentu pula. Marilah kita mencoba untuk menghitung jari-jari lintasan stasioner dan tingkat energinya. **Gambar (8.6)** menggambarkan sebuah elektron yang mengorbit di sekitar inti pada jarak r.



Gambar 8.6 *Orbit elektron*

Berdasarkan hukum Coulomb antara elektron dan inti atom akan terjadi gaya interaksi, yaitu gaya tarik. Gaya tarik coulomb ini sebagai gaya sentripetal elektron mengelilingi inti atom.

Gaya Coulomb $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

Gaya Sentripetal $F = m\frac{v^2}{r}$

Gaya Coulomb = Gaya sentripetal

$$m\frac{v^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}$$

$$mv^2 = k\frac{e^2}{r}$$

Energi kinetik elektron

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k\frac{e}{r}$$

Energi potensial elektron

$$Ep = q\ V$$

$$= (-e)\ k\frac{e}{r}$$

$$= -k\frac{e^2}{r}$$

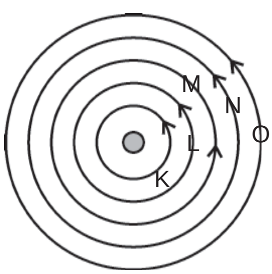
Energi total elektron

$$E = Ek + Ep$$

$$= \frac{1}{2}k\frac{e^2}{r} - k\frac{e^2}{r}$$

$$E = -\frac{1}{2}k\frac{e^2}{r} \quad .... \ (8.2)$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa untuk mengeluarkan elektron dari lintasannya memerlukan energi. Elektron menempati lintasan stasioner terdekat dengan inti disebut kulit K, lintasan berikutnya berturut-turut disebut kulit L, M, N, O dan seterusnya.

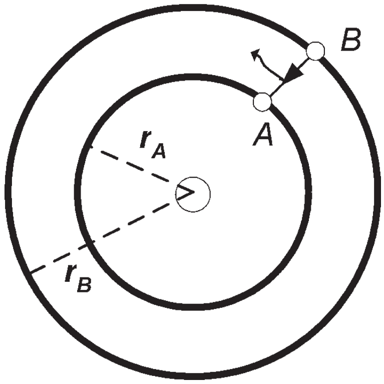


Gambar 8.7 *Lintasan stasioner elektron*

Kulit K dengan jari-jari r_1 energinya E_1 dan kulit L yang jari-jarinya r_2 energinya E_2. Karena $r_2 > r_1$ maka nilai $E_2 > E_1$. Jadi makin jauh dari inti atom, energi elektron semakin besar, yang berarti elektron pada kulit N memiliki energi yang lebih besar dari elektron pada kulit M.

Untuk menjelaskan spektrum garis atom hidrogen Bohr menggunakan postulat yang kedua. Misalkan elektron berpindah dari lintasan B dengan jari-jari orbit r_B ke lintasan A dengan jari-jari r_A ($r_B > r_A$) maka elektron akan melepaskan energi sebesar $E_B - E_A$ yang sama dengan hf. Dengan persamaan :

$$E = hf = E_B - E_A \qquad \text{.... (8.3)}$$



Gambar 8.8 Elektron berpindah dari lintasan B ke lintasan A ($r_B > r_A$)

$$h\frac{c}{\lambda} = -\frac{1}{2}\mathrm{k}\frac{e^2}{r_B} - \left(-\frac{1}{2}\mathrm{k}\frac{e^2}{r_A}\right)$$

$$h\frac{c}{\lambda} = -\frac{1}{2}k\frac{e^2}{r_B} + \frac{1}{2}k\frac{e^2}{r_A}$$

$$h\frac{c}{\lambda} = \frac{ke^2}{2}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{ke^2}{2hc}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right) \qquad \text{.... (8.4)}$$

Jari- jari orbit elektron didapat dari postulat Bohr ketiga yaitu:

$$L = mvr = \frac{nh}{2\pi}$$

$$v = \frac{nh}{2\pi mr} \text{ atau } v^2 = \frac{n^2h^2}{4\pi^2m^2r^2}$$

Dari persamaan energi kinetik

$$Ek = ½\, mv^2 = ½\, k\frac{e^2}{r}$$

$$½\, m\left(\frac{n^2h^2}{4\pi^2m^2r^2}\right) = ½\, k\,\frac{e^2}{r}$$

$$\frac{n^2h^2}{4\pi^2mr} = ke^2$$

$$r = \frac{n^2h^2}{4mk\pi^2e^2} \qquad \text{.... (8.5)}$$

$$r = \frac{h^2}{4mk\pi^2e^2}n^2$$

Dengan memasukkan nilai h (konstanta Planck), m (massa elektron), k (konstanta Coulomb) dan e (muatan elektron) diperoleh jari-jari lintasan elektron pada lintasan n adalah:

$$r_n = \frac{(6,625 \times 10^{-34})^2}{4(9,1 \times 10^{-31})(9 \times 10^9)(3,14)^2(1,66 \times 10^{-19})^2} n^2$$

$$r_n = 0,53 \times 10^{-11} n^2 \text{ m}$$

Apabila Persamaan (8.5) disubstitusikan ke dalam Persamaan (8.4) diperoleh :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{ke^2}{2hc}\left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{ke^2}{2hc}\left(\frac{1}{\frac{n^2{}_A h^2}{4\pi^2 mke^2}} - \frac{1}{\frac{n^2{}_B h^2}{4\pi^2 mke^2}}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k^2 me^2}{h_c^3}\left(\frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2}\right)$$

Jika $\frac{2\pi^2 k^2 me^2}{h^3 c} = R$ maka kita dapatkan

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2}\right)$$

Maka besarnya energi elektron pada lintasan ke n adalah:

$$E_n = -\tfrac{1}{2} k\frac{e^2}{r}$$

$$= -\tfrac{1}{2} ke^2\left(\frac{4\pi^2 kme^2}{n^2 h^2}\right)$$

$$E_n = -\left(\frac{4\pi^2 k^2 me^4}{2n^2 h^2}\right)$$

Jika nilai π = 3,14 , $k = 9 \times 10^9$ Nm^2/C^2 , $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, h = $6,62 \times 10^{-34}$ Js, dan 1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J kita dimasukkan dalam persamaan, maka didapatkan energi elektron pada suatu lintasan tertentu adalah:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}\ eV \qquad \text{................ (8.6)}$$

Persamaan (8.6) menunjukkan bahwa *energi total* elektron terkuantisasi. Dengan energi terendah E_1 *(n = 1)* disebut *tingkat energi dasar (keadaan dasar)* dan tingkat energi berikutnya E_2, E_3, E_4 .... *(n = 2, 3, ...)* yang tingkat energinya lebih tinggi disebut *tingkat eksitasi (keadaan eksitasi).* Apabila keadaan nilai n semakin besar, maka tingkat energinya pun semakin besar, sehingga untuk nilai $n = \infty$, nilai $E_n = 0$ yang berarti elektron tersebut tidak terikat oleh inti menjadi elektron bebas. Energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron dari ikatan intinya (dari orbitnya) disebut *energi ionisasi*, untuk melepaskan elektron pada atom hidrogen dari keadaan dasar diperlukan energi sebesar +13,6 eV karena energi tingkat dasar pada atom hidrogen adalah –13,6 eV.

Kelemahan model atom Bohr yaitu :

1. Lintasan orbit elektron sebenarnya sangat rumit, tidak hanya berbentuk lingkaran atau elips saja.
2. Model atom Bohr hanya dapat menjelaskan dengan baik untuk atom hidrogen, akan tetapi tidak dapat menjelaskan dengan baik untuk atom-atom berelektron banyak (atom kompleks).
3. Model atom Bohr tidak dapat menjelaskan tentang terjadinya *efek Zeeman*, yaitu terpecahnya spektrum cahaya jika dilewatkan pada medan magnet yang kuat.
4. Model atom Bohr tidak dapat menjelaskan terjadinya ikatan kimia dengan baik.

Teori atom Bohr juga tidak bisa menjelaskan masalah atom berelektron banyak yang memiliki spektrum yang lebih kompleks. Dengan demikian teori model atom Bohr masih memerlukan perbaikan dan pengembangan. Maka pada tahun 1920 **Schrodinger**, **Heisenberg** dan beberapa peneliti yang lain mencoba menjelaskan masalah ini dengan menggunakan *teori kuantum atom.*

Contoh Soal

1. Berapakah panjang gelombang terpendek dari spektrum pada deret Balmer?

   Penyelesaian :

   Pada deret Balmer akan memancarkan spektrum dengan gelombang yang paling pendek jika elektron berasal dari elektron bebas ($n_B = \infty$) berpindah ke lintasan untuk n_A = 2 maka

   $$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2}\right)$$

   $$= 1{,}097{,}10^7\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty}\right)$$

   $$= 1.097 \times 10^7\left(\frac{1}{4}\right)$$

   $$= \frac{4}{1{,}097 \times 10^7} = 4{,}388 \times 10^{-7}\text{ m}$$

   Jadi panjang gelombang terpendek dari spektrum pada deret Balmer sebesar $4{,}388.10^{-7}$ m.

2. Hitunglah frekuensi terkecil dari spektrum pada deret Lyman!

   Penyelesaian :

   Akan dipancarkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi terendah pada deret Lyman apabila elektron berpindah dari kulit L (n_B = 1) ke kulit K (n_A = 1) maka :

   $$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2}\right)$$

   $$= 1{,}097 \times 10^7\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right)$$

   $$= 1{,}097 \times 10^7\left(1 - \frac{1}{4}\right)$$

   $$= 1{,}097 \times 10^7\left(\frac{3}{4}\right)$$

   $$= \frac{3{,}291 \times 10^7}{4}$$

   $$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3{,}291 \times 10^7}{4} \times 3 \times 10^8\text{ Hz}$$

   $$= 2{,}45 \times 10^{15}\text{ Hz}$$

   Jadi frekuensi terkecil dari spektrum pada Deret Lyman sebesar $2{,}45.10^{15}$ Hz.

3. Hitunglah energi kinetik elektron pada orbitnya pada n = 2!

Penyelesaian :

$$E_K = \frac{ke}{2r} \text{ di mana } r = 0,53 \times 10^{-11}\ n^2$$

$$= \frac{9\times10^{9}\times1,6\times10^{-19}}{2\times0,53\times10^{-11}\times2^{2}}$$

$$= \frac{14,4\times10^{-10}}{4,24\times10^{-11}} = 3,396 \text{ eV}$$

Jadi energi kinetiknya sebesar 3,396 eV.

Soal Latihan :

1. Berapakah panjang gelombang terpanjang dari deret Paschen?
2. Berapakah frekuensi terbesar dari deret Brackett?
3. Hitung kecepatan orbit elektron pada n = 2!
4. Tentukan frekuensi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan jika elektron berpindah dari lintasan n = 5 ke n = 2!
5. Tentukan frekuensi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan jika elektron berpindah dari kulit O ke kulit M!
6. Tentukan energi (dalam eV) yang dilepaskan jika elektron berpindah dari kulit N ke kulit K!

Untuk menjawab soal-soal di atas gunakan :

h	$= 6,6 \times 10^{-34}$ Js	k	$= 9 \times 10^{9}$ Nm^2/C^2
m	$= 9,1 \times 10^{-31}$ kg	R	$= 1,097 \times 10^{7}$ m^{-1}
e	$= 1,6 \times 10^{-19}$ C	c	$= 3 \times 10^{8}$ m/s

G. Teori Kuantum Atom

Louis de Broglie seorang ahli Fisika dari Perancis pada tahun 1923 mengajukan hipotesis tentang gelombang materi. Menurutnya, gerakan partikel yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, seperti halnya gerakan elektron mengitari inti atom, mempunyai sifat gelombang. Hipotesis ini dibuktikan

kebenarannya oleh **Davidson** dan **Germer** dengan mengamati pola-pola difraksi elektron yang berenergi tertentu yang ditembakkan pada lempeng logam nikel.

Thomson menemukan bahwa elektron memberi sifat difraksi sama seperti sinar X, sifat gelombang dari elektron ini kemudian digunakan pada mikroskop elektron.

Pada tahun 1926 **Erwin Schrodinger** seorang ahli Fisika dari Austria berhasil merumuskan persamaan gelombang untuk menggambarkan bentuk dan tingkat energi orbital. Model atom ini disebut *model atom mekanika kuantum* dan merupakan model atom yang diterima hingga dewasa ini. Model atom mekanika kuantum mempunyai persamaan dengan model atom Bohr dalam hal tingkat energi. Sedangkan perbedaan kedua model atom tersebut terletak pada bentuk lintasan elektron, di mana pada model atom Bohr elektron-elektron menempati lintasan-lintasan berbentuk lingkaran dengan jari-jari tertentu, sedangkan pada model atom mekanika kuantum, lintasan-lintasan elektronnya berbentuk elips bukan berbentuk lingkaran yang lebih dikenal dengan *orbital*. Untuk menyatakan lintasan/orbit elektron berbentuk elips diperlukan 4 macam bilangan kuantum yaitu :

1. Bilangan kuantum utama (n)
2. Bilangan kuantum orbital (l)
3. Bilangan kuantum magnetik (m_l)
4. Bilangan kuantum spin (m_s)

1. Bilangan Kuantum Utama (*n*)

Bilangan kuantum utama menentukan besarnya energi total elektron pada orbit/lintasan elektron pada kulit atom. Besarnya energi total elektron pada atom bersifat kekal dan besarnya energi pada masing-masing kulit atom ditentukan oleh bilangan kuantum utama. Bilangan kuantum utama mempunyai harga positif yaitu 1, 2, 3, ... dst. Bilangan kuantum utama menyatakan tempat lintasan /orbit elektron dalam atom yang disebut *kulit atom* yang diberi nama dengan huruf besar, yaitu kulit K untuk $n = 1$, L untuk $n = 2$, M untuk $n = 3$, dan seterusnya.

Bilangan kuantum utama (n)	1	2	3	4	5	6	7
Nama kulit atom	K	L	M	N	O	P	Q

Telah diterangkan di muka bahwa energi total elektron pada orbit adalah kekal dan memiliki harga negatif yang berarti untuk melepaskan elektron dari orbitnya diperlukan energi. Besarnya energi elektron pada atom hidrogen pada kulit ke-n dinyatakan :

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2}\, eV \qquad \text{.... (8.7)}$$

Sedangkan untuk atom lain yang memiliki sebuah elektron seperti halnya He^+, Li^{+2} atau Be^{+3} energi total elektronnya dinyatakan :

$$E_n = -\frac{13,6\, Z^2}{n^2}\, eV \qquad \text{.... (8.8)}$$

Dimana : n = bilangan kuantum utama

Z = nomor atom

2. Bilangan Kuantum Orbital (*l*)

Bilangan kuantum orbital yang diberi simbol l menyatakan besarnya momentum sudut elektron mengelilingi inti atom. Momentum sudut diberi lambang L dan besarnya dinyatakan dalam persamaan :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \qquad \text{.... (8.9)}$$

di mana L = Momentum sudut/anguler elektron

l = bilangan kuantum orbital

$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}054 \times 10^{-34}$ Js

Nilai bilangan kuantum orbital dinyatakan $l = (n - 1)$ yaitu 0, 1, 2, 3, …, n–1. Keadaan momentum sudut elektron pada orbitnya menyatakan *subkulit* elektron pada inti atom yang diberi nama sub kulit *s, p, d, e, f, g* dan seterusnya sesuai dengan urutan abjad. Di mana pemberian nama subkulit diambil dari huruf awal klasifikasi spektrum yang memancarkan elektron, yaitu *sharp* (tajam) = *s* , *principal* (utama) = *p* , *diffuse* (kabur) = *d* , *fundamental* (pokok) = *f*.

Besarnya momentum sudut pada masing-masing subkulit dapat dinyatakan sebagai berikut :

Bilangan kuantum orbital	l = 0	l = 1	l = 2	l = 3	l = 4	l = ...
Subkulit	s	p	d	f	g	....
Besarnya momentum sudut	0	$\hbar\sqrt{2}$	$\hbar\sqrt{6}$	$\hbar\sqrt{12}$	$\hbar\sqrt{20}$	....

Kombinasi antara bilangan kuantum utama (n) dengan bilangan kuantum orbital (l) sering digunakan untuk menyatakan keadaan suatu atom, yang juga dapat untuk menyatakan jumlah elektron dalam kulit atau subkulit atom. Misalnya untuk n = 2 dan l = 0 menyatakan keadaan elektron pada subkulit 2s, untuk n = 3 dan l = 2 menyatakan keadaan elektron pada 3d, dan seterusnya yang secara lengkap dapat dinyatakan dalam tabel berikut :

n	l = 0	l = 1	l = 2	l = 3	l = 4	l = 5
n = 1	1s					
n = 2	2s	2p				
n = 3	3s	3p	3d			
n = 4	4s	4p	4d	4f		
n = 5	5s	5p	5d	5f	5g	
n = 6	6s	6p	6d	6f	6g	6h

3. Bilangan Kuantum Magnetik (m_l)

Bilangan kuantum magnetik yang diberi simbol m_l, *digunakan untuk menyatakan arah momentum sudut elektron.* Oleh karena momentum termasuk besaran vektor, maka momentum sudut elektron selain dinyatakan besarnya, juga perlu diketahui arahnya. Arah momentum sudut (L) dapat dinyatakan dengan aturan *kaidah tangan kanan* yaitu *jika arah lipatan jari-jari tangan kanan menyatakan arah gerakan elektron maka arah ibu jari tangan kanan menyatakan arah momentum sudut elektronnya*. Bilangan kuantum magnetik mempunyai harga dari $-l$ melalui 0 hingga $+l$, sehingga untuk setiap bilangan kuantum orbital l akan ada sebanyak bilangan kuantum magnetik sebanyak $(m_l) = (2l + 1)$.

Menurut para tokoh Fisika modern (Schrodinger, Heinsenberg), momentum sudut mempunyai komponen X, Y dan Z, untuk komponen X atau Y dari momentum sudut mempunyai besar yang sembarang, akan tetapi untuk komponen Z tidak sembarang tetapi *terkuantisasi*. Besarnya momentum sudut elektron dipengaruhi oleh medan magnet luar (B) apabila medan magnet luar sejajar dengan sumbu z maka besarnya nilai L untuk arah Z memenuhi persamaan :

$$L_z = m_l \hbar \qquad \text{.... (8.10)}$$

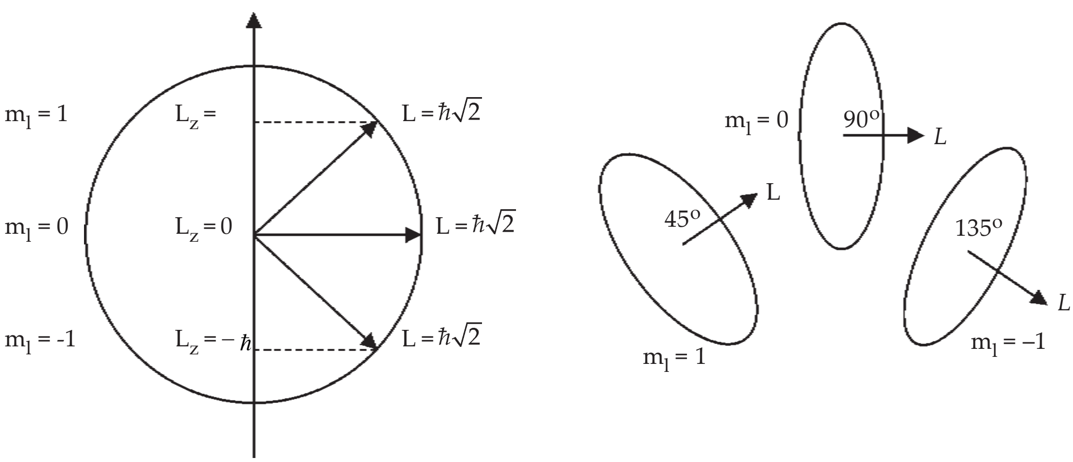
Sehingga banyaknya m_l untuk setiap nilai l = 0 dalam arah Z terdapat satu nilai m_l = 0, sedangkan untuk nilai l = 1 terdapat 3 nilai m yaitu -1, 0, 1 dan besar momentum sudut ke arah sumbu Z (L_Z) untuk l = 1 yaitu $-\hbar$, 0 , $+\hbar$ dan arah vektor momentum sudut terhadap sumbu Z dapat dicari sebagai berikut :

$$\cos \theta_1 = \frac{L_Z}{L} = \frac{\hbar}{\hbar\sqrt{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{2} \text{ maka nilai } \theta_1 = 45^o$$

$$\cos \theta_2 = \frac{L_Z}{L} = \frac{0}{\hbar\sqrt{2}} = 0 = 0 \text{ maka nilai } \theta_2 = 90^o$$

$$\cos \theta_3 = \frac{L_Z}{L} = \frac{-\hbar}{\hbar\sqrt{2}} = -\frac{1}{2}\sqrt{2} \text{ maka nilai } \theta_3 = 135^o$$

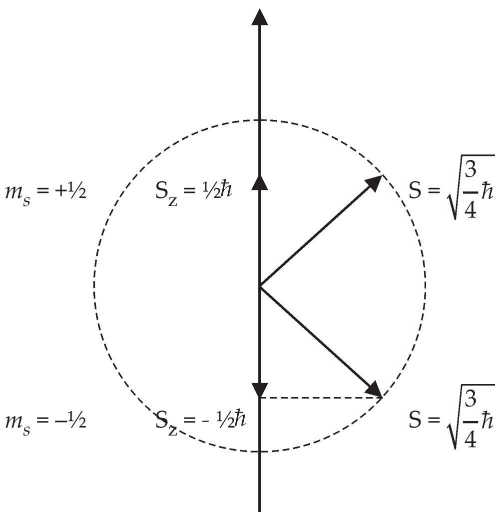
Kemungkinan besar momentum sudut dan arahnya serta bentuk lintasan/ orbit elektron pada bilangan orbital = 1 dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 8.9 *Momentum sudut pada bilangan orbital = 1*

4. Bilangan Kuantum Spin (m_s)

Bilangan kuantum spin mula-mula dikemukakan oleh **Wolfgang Pauli** setelah mengamati tentang spektrum atom hidrogen dengan menggunakan spektroskopis yang mempunyai daya pisah (ketelitian) yang tinggi. Hasilnya diperoleh bahwa setiap spektrum garis yang diamati selalu terdiri atas sepasang garis yang saling berdekatan. Menurut *Pauli* garis ini pastilah berasal dari transisi dari 2 tingkat energi yang sangat berdekatan. Pauli menduga bahwa kedua tingkat energi ini berhubungan dengan momentum sudut instrinsik elektron yang berbeda dengan momentum sudut orbital. *Momentum sudut instrinsik* yaitu momentum sudut yang ada dalam elektron itu sendiri. Selain bergerak mengelilingi inti atom, elektron pun juga bergerak pada porosnya (sumbunya). Gerakan elektron pada sumbunya ini menghasilkan momentum sudut spin yang berkaitan dengan momentum sudut instrinsik elektron yang dinyatakan sebagai bilangan kuantum spin yang diberi simbol m_s. Ada dua bilangan kuantum spin, yaitu $m_s = +½$ dan $m_s = -½$. *Harga positif menyatakan arah spin ke atas berotasi berlawanan arah gerak jarum jam, sedangkan harga negatif menyatakan spin ke bawah berotasi searah gerak jarum jam.*



Gambar 8.10 *Momentum sudut intrinsik/spin elektron*

Pendapat yang dikemukakan oleh Pauli ini didukung oleh *Goudsmit* dan *Uhlenbeck* yang menjelaskan bahwa besarnya momentum sudut intrinsik atau spin dinyatakan dalam persamaan :

$$S = \hbar\sqrt{m_s\,(m_s + 1} \qquad \text{.... (8.11)}$$

dimana : S = momentum sudut spin

m_s = bilangan kuantum spin

$\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$

Besarnya komponen momentum sudut spin elektron sepanjang arah medan magnetik ke arah sumbu Z dinyatakan:

$$S_z = m_s\hbar = \pm\frac{1}{2}\hbar$$

Contoh Soal

1. Ada berapa kemungkinan bilangan kuantum magnetik pada bilangan kuantum utama n = 3?

   Penyelesaian:

   Banyaknya kemungkinan bilangan kuantum magnetik dinyatakan :

   $m_l = 2l + 1$ di mana $l = (n - 1)$

   untuk n = 3 maka nilai l = (3 – 1) = 2, maka jumlah bilangan kuantum magnetik sebanyak :

   m_l = 2.2 + 1 = 4 + 1 = 5 yakni 2, 1, 0, –1 dan –2.

2. Tentukan besarnya momentum sudut yang mungkin pada tingkatan n = 3 jika dinyatakan dalam $\hbar$!

   Penyelesaian :

   Besarnya momentum sudut elektron yang mengelilingi inti atom dinyatakan :

   $L = \sqrt{1(l+1)}.\hbar$

   Untuk n= 3 terdapat lima bilangan kuantum magnetik, maka terdapat 5 nilai momentum sudut yaitu :

   1. untuk l = 2 maka $L = \sqrt{2(2+1)}\,\hbar = \sqrt{6}\hbar$
   2. untuk l = 1 maka $L = \sqrt{1(1+1)}\,\hbar = \sqrt{2}\hbar$
   3. untuk l = 0 maka $L = \hbar$
   4. untuk l = –1 maka $L = -\sqrt{2}\hbar$
   5. untuk l = –2 maka $L = -\sqrt{6}\hbar$

Soal Latihan :

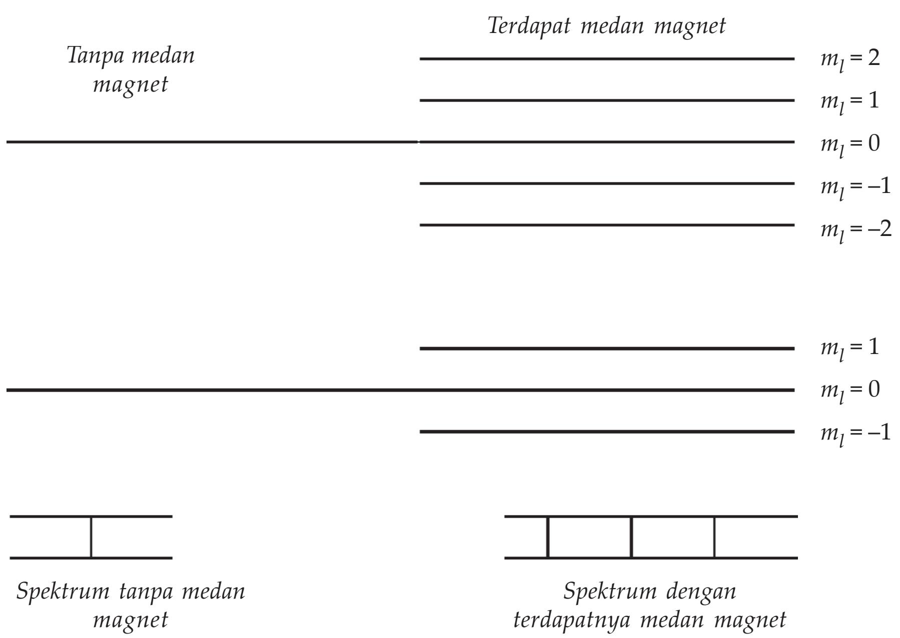
1. Tentukan berapa banyaknya bilangan kuantum orbital untuk bilangan kuantum utama = 4!
2. Berapa banyak bilangan kuantum magnetik untuk bilangan kuantum utama = 5?
3. Hitunglah besarnya momentum sudut yang kemungkinan dimiliki elektron yang menempati bilangan kuantum utama = 5!

H. Efek Zeeman

Apa yang akan terjadi apabila atom berada dalam medan magnet?

Dalam medan magnet, energi keadaan atomik tertentu tergantung pada harga m_l seperti juga pada n. Keadaan atom dengan bilangan kuantum n, terpecah menjadi beberapa sub keadaan jika atom itu berada dalam medan magnetik, dan energinya bisa sedikit berubah lebih besar atau lebih kecil dari keadaan tanpa medan magnet. Gejala itu menyebabkan terpecahnya spektrum garis menjadi garis-garis halus yang terpisah jika atom dilewatkan dalam medan magnetik, dengan jarak antara garis bergantung dari besarnya medan magnet itu. Peristiwa terpecahnya spektrum garis menjadi garis-garis halus dalam medan magnet ini disebut *efek Zeeman*, nama ini diambilkan dari nama seorang fisikawan Belanda **Zeeman** yang telah melakukan pengamatan efek ini pada tahun1896.

Suatu keadaan atom dengan bilangan kuantum orbital ℓ dalam medan magnet terpecah menjadi $2\ell + 1$, jika atom itu berada dalam medan magnet yaitu menjadi $+\ell$, 0 dan $-\ell$. Akan tetapi perubahan m_l terbatas pada $\Delta m_l = 0, \pm l$ maka garis spektrum yang timbul dari transisi antara dua keadaan dengan l yang berbeda hanya terpecah menjadi tiga komponen yang dapat ditunjukkan oleh **Gambar (8.11)** berikut ini.



***Gambar 8.11** Atom yang berada dalam medan magnet*

Life Skills : Kecakapan Akademik

Adanya sinar laser yang sekarang banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang misalnya bidang kedokteran sebagai pisau bedah, industri dapat digunakan untuk memotong lempengan baja, komunikasi untuk mentransfer data dalam jumlah besar, penelitian untuk mengukur jarak bumi ke bulan, halografi untuk membuat gambar tiga dimensi dan sebagainya. Timbulnya sinar laser ini menunjukkan adanya tingkat energi elektron dalam atom. Carilah sumber bacaan yang berkaitan dengan sinar laser misalnya bagaimana sinar laser tersebut terjadi, sifat-sifat sinar laser, jenisnya dan kegunaannya. Kemudian buatlah ulasan dan tanggapan secara tertulis dari bacaan tersebut secara perseorangan atau kelompok, untuk dipresentasikan di depan kelas!

Seputar Tokoh



Louise de Broglie (1892) berkebangsaan Prancis yang pada awalnya belajar Sejarah, akan tetapi akhirnya mengikuti jejak kakaknya Maurice untuk membina karirnya di bidang Fisika. Dalam tahun 1924 Louise de Broglie dalam tesisnya mengemukakan usulan bahwa benda yang bergerak mempunyai sifat gelombang yang melengkapi sifat partikelnya. Kebenaran akan gagasan gelombang partikel yang dikemukakan de Broglie terbukti pada tahun 1927 dalam eksperimen difraksi berkas elektron yang dilakukan oleh Davisson dan Germer dan pada tahun 1929 Louise de Broglie mendapat hadiah Nobel. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Teori atom Rutherford dan teori atom Bohr mempunyai kesamaan, yaitu massa atom terpusat pada satu titik yang dinamakan inti atom.
2. Untuk menjelaskan/menutupi kelemahan atom Rutherford, Bohr mengemukakan tiga postulatnya yaitu :
   a. Elektron berotasi mengelilingi inti tidak pada sembarang lintasan, tetapi pada lintasan-lintasan tertentu tanpa membebaskan energi. Lintasan ini disebut lintasan stasioner dan memiliki energi tertentu.
   b. Elektron dapat berpindah dari lintasan yang satu ke lintasan yang lain. Jika elektron pindah dari lintasan berenergi rendah (lintasan dalam) ke lintasan berenergi tinggi (lintasan luar) akan menyerap energi dan sebaliknya akan memancarkan energi. Energi yang dipancarkan/diserap elektron sebesar hf.
   c. Lintasan-lintasan yang diperkenankan elektron adalah lintasan-lintasan yang mempunyai momentum sudut kelipatan bulat dari $\frac{\hbar}{2\pi}$.
3. Besarnya jari-jari lintasan orbit elektron menurut Bohr adalah :

   $$r = \frac{n^2h^2}{4mk\pi^2e^2}$$
4. Besarnya energi total elektron atom hidrogen dalam tingkat dasar adalah -13,6 eV sehingga untuk mengionkan atom hidrogen diperlukan energi sebesar 13,6 eV.
5. Berdasarkan hasil pengamatan spektrum yang dipancarkan oleh atom hidrogen terdapat lima derat spektrum yaitu :
   a. Deret Lyman (pada daerah sinar ultra violet)
   b. Deret Balmer (pada daearah cahaya tampak)
   c. Deret Pashen (pada daerah sinar infra merah ke-1)
   d. Deret Brackett (pada daerah sinar infra merah ke-2)
   e. Deret Pfund (pada daerah sinar infra merah ke-3)
6. Elektron akan menyerap energi jika berpindah dari tingkat energi rendah ke tingkat energi yang lebih tinggi (dari lintasan dalam ke lintasan luar), dan sebaliknya akan memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik jika berpindah dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah (dari lintasan luar ke lintasan lebih dalam).
7. Untuk menjelaskan atom berelektron banyak teori mekanika kuantum menggunakan empat macam bilangan kuantum yaitu :
   a. bilangan kuantum utama (n)
   b. bilangan kuantum orbital (l)
   c. bilangan kuantum magnetik (m_l)
   d. bilangan kuantum spin (m_s)
8. Efek Zeeman yaitu gejala terpecahnya spektrum garis menjadi garis-garis halus apabila melewati medan magnet.

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Bila elektron berpindah dari kulit M ke kulit K pada atom hidrogen dan R adalah konstanta Rydberg, maka panjang gelombang yang terjadi besarnya ....
   A. $\frac{8}{9R}$
   B. $\frac{9}{8R}$
   C. $\frac{17}{9R}$
   D. $\frac{9}{17R}$
   E. $\frac{1}{R}$

2. Elektron atom hidrogen model Bohr mengelilingi intinya dengan bilangan kuantum n. Bila energi ionisasi atom itu bernilai 1/16 kali energi ionisasi atom itu dalam keadaan dasarnya , maka nilai n adalah ....
   A. 2
   B. 4
   C. 6
   D. 8
   E. 16

3. Deret Paschen terjadi jika elektron berpindah dari ....
   A. kulit M ke kulit K
   B. kulit O ke kulit L
   C. kulit P ke kulit M
   D. kulit P ke kulit N
   E. kulit P ke kulit O

4. Apabila elektron berpindah dari kulit N ke kulit L maka spektrum yang dipancarkan termasuk dalam deret ....
   A. deret Brakett
   B. deret Lyman
   C. deret Pfund
   D. deret Balmer
   E. deret Paschen

5. Panjang gelombang terbesar dari deret Balmer adalah .... (dalam Angstrom)
   A. 1215
   B. 4050
   C. 5127
   D. 6563
   E. 8752

6. Panjang gelombang terpendek dari deret Paschen adalah ... (dalam Angstrom)
   A. 911
   B. 3646
   C. 8204
   D. 14585
   E. 22789

7. Besarnya energi yang diperlukan oleh sebuah elektron untuk berpindah dari kulit n = 2 ke n = 4 adalah sebesar ....
   A. 0,85 eV
   B. 2,55 eV
   C. 3,4 eV
   D. 4,2 eV
   E. 5,1 eV

8. Berikut ini beberapa kesamaan antara model atom Rutherford dan model atom Bohr, **kecuali** ....
   A. elektron berputar mengelilingi inti dengan membebaskan sejumlah energi
   B. elektron merupakan bagian atom yang bermuatan negatif
   C. atom berbentuk bola kosong dengan inti berada di tengah
   D. secara keseluruhan atom bersifat netral
   E. massa atom terpusat pada inti atom

9. Kesimpulan yang dapat diambil dari percobaan hamburan Rutherford adalah ....
   A. muatan atom tersebar merata pada seluruh bagian atom
   B. elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu
   C. massa atom terpusat pada satu titik yang disebut inti atom
   D. elektron merupakan bagian atom yang bermuatan positif
   E. atom merupakan bagian terkecil dari unsur

10. Pada setiap atom terdapat beberapa jenis bilangan kuantum, untuk bilangan kuantum utama n = 4 memiliki bilangan kuantum orbital (l) sebanyak ....
   A. 2
   B. 3
   C. 4
   D. 5
   E. 6

11. Pada keadaan atom untuk bilangan kuantum utama n = 3 memiliki bilangan kuantum magnetik (m_s) sebanyak ....
   A. 2
   B. 3
   C. 4
   D. 5
   E. 6

12. Besarnya momentum sudut orbital elektron pada kulit N maksimumnya dalah ....
   A. $2\sqrt{3}\,\hbar$
   B. $\sqrt{6}\,\hbar$
   C. $2\sqrt{5}\,\hbar$
   D. $2\sqrt{6}\,\hbar$
   E. $-\sqrt{6}\,\hbar$

13. Untuk bilangan kuantum orbital l = 2 terdapat bilangan kuantum magnetik sebanyak ....
    A. 3
    B. 5
    D. 9
    C. 7
    E. 11

14. Perbandingan antara panjang gelombang garis pertama deret Lyman dengan garis ke dua deret Balmer adalah ....
    A. 1 : 2
    B. 1 : 3
    C. 1 : 4
    D. 2 : 1
    E. 4 : 1

15. Menurut model atom Bohr, elektron bergerak mengelilingi inti hanya pada lintasan tertentu, dan besarnya momentum anguler elektron pada lintasan itu adalah ....
    A. berbanding terbalik dengan tetapan Planck
    B. berbanding lurus dengan tetapan Planck
    C. berbanding lurus dengan tetapan Rydberg
    D. berbanding terbalik dengan tetapan Rydberg
    E. berbanding terbalik dengan momentum linier

B. Kerjakan soal di bawah ini dengan benar!

1. Bacalah model atom dari Thomson, Rutherford, dan Bohr. Coba jelaskan perbedaan dan persamaan dari model atom tersebut!
2. Coba jelaskan secara singkat usaha Bohr untuk menutupi kelemahan model atom Rutherford!
3. Sebutkan 4 kelemahan dari model atom Bohr!
4. Suatu tingkatan energi elektron pada atom hidrogen s dinyatakan sebagai 3d.
    a. Berapakah bilangan kuantum utamanya?
    b. Berapakah bilangan kuantum orbitalnya?

c. Hitunglah besarnya momentum sudut orbital elektronnya!

d. Berapa banyak bilangan kuatum orbital pada tingkatan itu?

5. Hitunglah energi yang dilepaskan apabila elektron berpindah dari :

a. kulit O ke kulit K

b. kulit P ke kulit L

c. kulit M ke kulit K

Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. perkembangan teori atom,
2. model atom Dalton,
3. model atom Thomson,
4. model atom Rutherford,
5. model atom Bohr,
6. efek Zeeman.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum melanjutkan ke bab berikutnya.

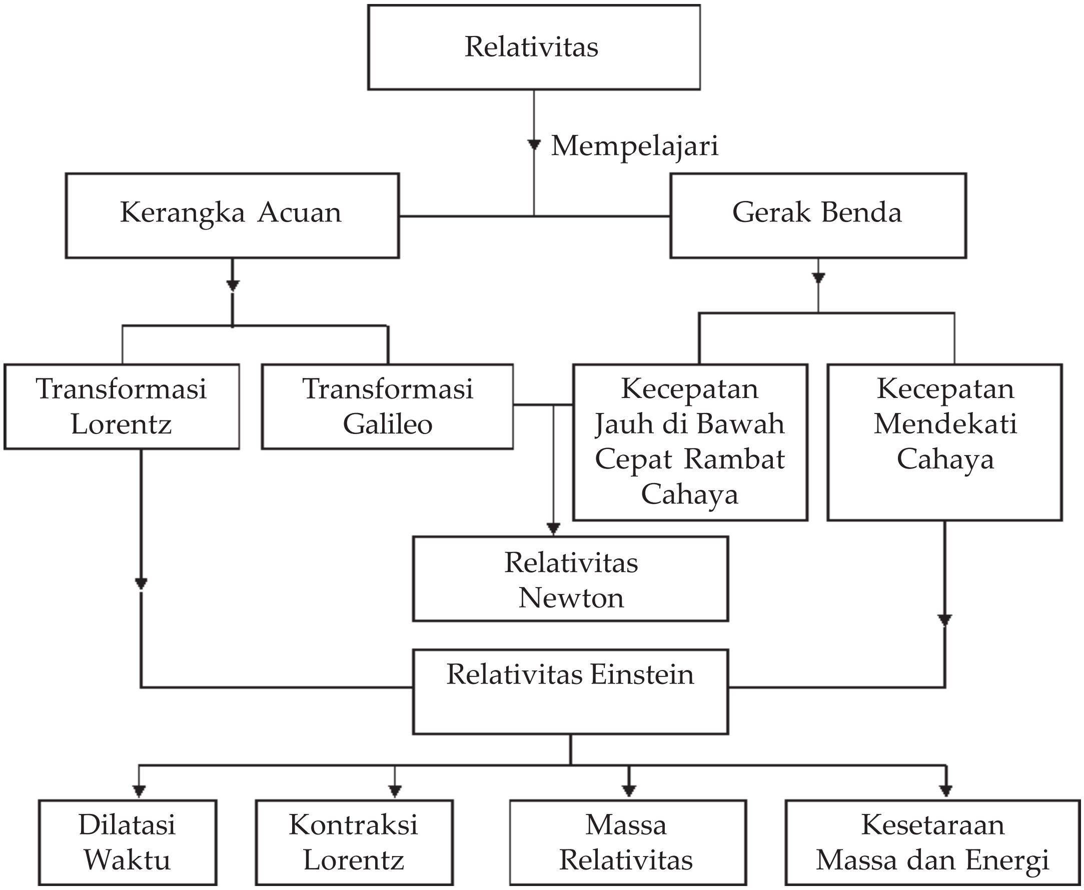
Bab IX
Relativitas



Sumber : http://www.picture.neusletter.com

Gerak itu relatif bagi pengamat. Bayangkan seorang pengemudi berada di dalam mobil yang sedang melaju dengan kecepatan tetap di garis lurus. Karena gerak itu relatif, ia dapat mengatakan bahwa mobil yang dikendarainya tidak bergerak dan orang yang ada di pinggir lintasan bergerak mundur melewatinya.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. memformulasikan teori relativitas untuk waktu, panjang, dan massa, dan
2. memformulasikan kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

Motivasi Belajar

Teori relativitas mempelajari bagaimana pengukuran besaran fisika yang bergantung pada pengamat seperti halnya dengan peristiwa yang diamati. Relativitas mempunyai pengaruh yang penting dalam berbagai cabang fisika mekanika, termodinamika, listrik magnet, optik dan fisika atom.

Karena pentingnya materi ini, maka pelajarilah bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

titik acuan, relatif, relativitas Newton, relativitas Einstein, kerangka acuan, relativitas khusus, relativitas umum, transformasi Lorentz, dilatasi, kontraksi Lorentz, massa relatif

A. Relativitas Newton

Suatu benda dikatakan *bergerak* apabila kedudukan benda itu *berubah terhadap kedudukan tertentu*. Untuk menyatakan benda itu bergerak kita harus menentukan suatu *titik acuan* atau *kerangka acuan* yang digunakan sebagai patokan/pedoman. Sebagai contoh, Hasan pergi ke Jakarta dengan naik kereta api, menurut pengamat yang berdiri diam di stasiun mengatakan Hasan itu bergerak, sedangkan menurut pengamat yang duduk di sebelah Hasan di dalam kereta itu mengatakan Hasan itu diam tidak bergerak. Jadi dalam hal ini Hasan dapat dikatakan diam atau bergerak tergantung pada titik acuan atau kerangka acuan yang dipakai. Apabila kerangka acuan adalah stasiun dikatakan Hasan bergerak, tetapi jika kerangka acuan yang digunakan adalah kereta api maka Hasan itu dikatakan diam.

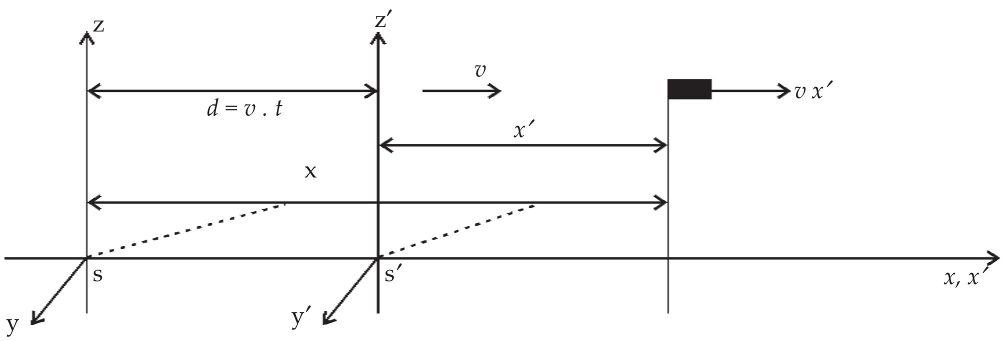
Berdasarkan contoh di atas *benda yang bergerak itu bersifat relatif*, yaitu tergantung pada kerangka acuan yang digunakan. Dalam peristiwa di atas terdapat dua kerangka acuan, yaitu *kerangka acuan yang diam* (kerangka acuan yang dipakai oleh pengamat yang diam di stasiun) dan *kerangka acuan yang bergerak* (kerangka acuan yang dipakai oleh pengamat yang diam di dalam kereta api yang bergerak). Stasiun kereta api yang kita anggap diam ini pun sebenarnya juga bergerak bersama-sama bumi mengelilingi matahari, matahari bersama-sama bintang-bintang yang lainnya bergerak dalam galaksi dan begitu seterusnya.

Dengan demikian gerak benda itu tidak mutlak melainkan bersifat relatif.

Dalam bab ini kita akan mempelajari tentang teori Relativitas Newton dan teori Relativitas Einstein. Teori relativitas Newton menjelaskan gerak-gerak benda jauh di bawah kecepatan cahaya sedangkan teori relativitas Einstein berlaku untuk kecepatan rendah maupun mendekati kecepatan cahaya.

1. Transformasi Galileo

Untuk menyatakan kedudukan sebuah titik atau benda kita memerlukan satu sistem koordinat atau kerangka acuan. Misalnya untuk menyatakan sebuah benda bergerak, seorang pengamat memerlukan suatu kerangka acuan dengan sistem koordinat misalnya (x, y, z). Jadi kerangka acuan adalah suatu sistem koordinat (x, y, z) di mana seorang pengamat melakukan pengamatan suatu kejadian. Dalam hal ini kita gunakan *kerangka acuan inersial* di mana hukum Newton berlaku. Kerangka acuan inersial yaitu suatu kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan terhadap kerangka acuan lain pada garis lurus. Untuk menyatakan hubungan antara pengamatan suatu kejadian peristiwa yang terjadi dalam suatu kerangka inersial, jika diamati oleh pengamat yang berada dalam kerangka acuan lain yang bergerak dengan kecepatan relatif konstan, digunakan transformasi Galileo.



Gambar 9.1 *Transformasi Galileo*

Gambar (9.1) menggambarkan kerangka acuan S dengan sistem koordinat (x , y, z) dan S′ dengan sistem koordinat (x′, y′, z′), di mana kerangka acuan S′ bergerak di dalam kerangka acuan S ke arah sumbu x positif dengan kecepatan relatif konstan sebesar v terhadap kerangka acuan S. Misalkan kerangka acuan S adalah kerangka acuan yang digunakan oleh pengamat yang berada di stasiun dan kerangka acuan S′ digunakan oleh pengamat yang berada di dalam kereta api.

Mula-mula kedua kerangka acuan berimpit (t = 0), setelah bergerak selama t sekon maka kerangka acuan S′ telah menempuh jarak $d = v\ t$. Apabila bersamaan kereta itu bergerak Hasan juga berjalan di dalam gerbong kereta api, searah dengan gerak kereta dengan kecepatan vx' relatif terhadap kereta api, maka kedudukan Hasan dapat dinyatakan dalam koordinat (x, y, z) terhadap kerangka S dan (x′, y, z′) terhadap kerangka S′. Sehingga kedudukan benda antara kerangka acuan S′ terhadap S dapat dinyatakan :

$$x' = x - v.t,\ y' = y,\ z' = z,\ t' = t \qquad \text{.... (9.1)}$$

Persamaan ini dikenal dengan transformasi Gallileo

Kebalikan tranformasi Galileo dinyatakan :

$$x\ =\ x' + v.t',\ y = y', z = z',\ t = t' \qquad \text{.... (9.2)}$$

Kecepatan Hasan berjalan menurut pengamat yang berada di S dan S′ dapat ditentukan menurut transformasi Gallileo sebagai berikut :

Pengamat di S′ Hasan berjalan dengan kecepatan v'_x sebesar :

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - v.t)}{dt} = \frac{dx}{dt'} - v\frac{dt'}{dt'} = v_x - v \qquad \text{.... (9.3)}$$

Pengamat di S Hasan berjalan dengan kecepatan v_x sebesar :

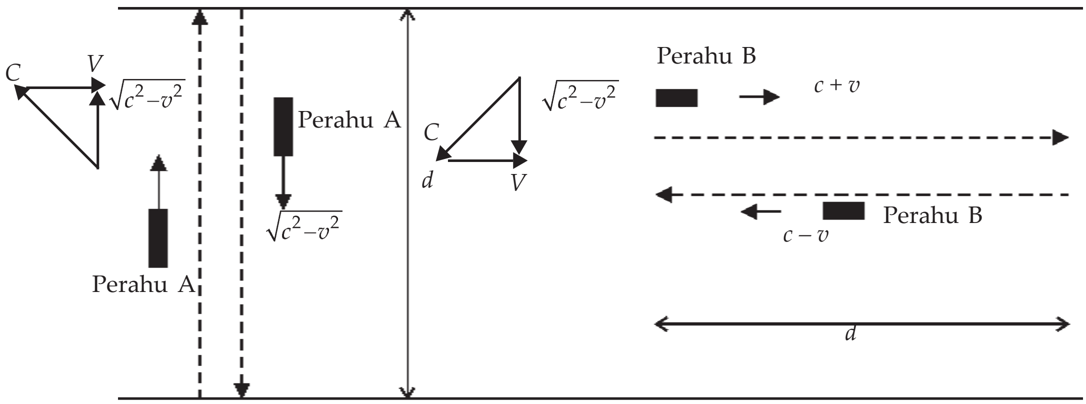
$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{d(x' + v.t)}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v\frac{dt}{dt} = v'_x + v \qquad \text{.... (9.4)}$$

Persamaan (9.3) dan (9.4) merupakan penjumlahan kecepatan transformasi Galileo yang kemudian dikenal dengan penjumlahan kecepatan menurut teori Relativitas Newton, di mana *relativitas Newton menyatakan bahwa semua hukum Fisika Mekanika Newton berlaku untuk semua kerangka acuan inersial, sedangkan kecepatan benda tergantung pada kerangka acuan (bersifat relatif).*

2. Percobaan Michelson dan Morley

Pada mulanya sesuai dengan teori gelombang dari Huygens bahwa gelombang memerlukan medium rambatannya untuk mencapai suatu tempat dan setelah Maxwell menyatakan bahwa cahaya tidak lain adalah gelombang elektromagnetik, maka para pakar fisika abad ke-19 segera melakukan berbagai usaha untuk mempelajari sifat zat perantara sebagai rambatan gelombang elektromagnetik. Para pakar mengajukan hipotesis medium yang dinamakan *eter* yang terdapat meskipun di ruang hampa .

Pada tahun 1887, **Michelsone** dan **Morley** dua orang ilmuwan Fisika berkebangsaan Amerika mengukur kelajuan eter dengan menggunakan *interferometer*. Hakekat percobaan ini membandingkan kelajuan cahaya sejajar dan tegak lurus pada gerak bumi mengelilingi matahari. Andaikan eter itu diam di alam semesta ini diharapkan ada kelajuan relatif eter terhadap bumi yang bergerak mengelilingi matahari. Percobaan ini berdasarkan prinsip penjumlah vektor, dengan menggunakan penalaran gerak perahu yang menyeberangi sungai sebagai berikut.



Gambar 9.2 *Gerak perahu menyeberangi sungai, perahu A bergerak tegak lurus arus sungai dan perahu B sejajar dengan arus sungai*

Perahu A bergerak menyeberangi sungai dalam lintasan tegak lurus sungai dan perahu B bergerak dengan lintasan sejajar arus sungai. Dengan membandingkan waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak pulang pergi dalam lintasan tegak lurus arus sungai dan waktu yang diperlukan untuk menempuh lintasan yang sejajar arus sungai dalam jarak yang sama yaitu d seperti pada **Gambar 9.2**. Jika kecepatan perahu itu *c*, dan kecepatan aliran sungai adalah v.

Kecepatan sesungguhnya perahu A menempuh lintasan adalah $\sqrt{c^2 - v^2}$, sehingga waktu yang diperlukan untuk menempuh lintasan A adalah :

$$t_A = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2\frac{d}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{.... (9.5)}$$

Untuk perahu B, kecepatan perahu sesungguhnya saat mengikuti arus adalah $c + v$ dan saat menentang arus adalah $c - v$, sehingga waktu yang diperlukan untuk menempuh lintasan adalah :

$$t_B = \frac{d}{c + v} + \frac{d}{c - v} = \frac{d(c + v) + d(c + v)}{c^2 - v^2} = \frac{2\frac{d}{c}}{c^2 - v^2} \quad \text{.... (9.6)}$$

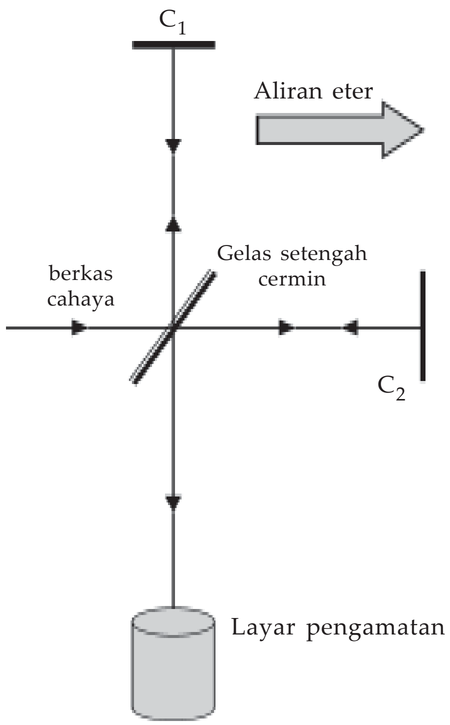
Sehingga diperoleh perbandingan:

$$\frac{t_A}{t_B} = \frac{\dfrac{2\frac{d}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}{\dfrac{2\frac{d}{c}}{c^2 - v^2}} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{.... (9.7)}$$

Apabila kecepatan perahu c diketahui dan $\frac{t_A}{t_B}$ dapat diukur, maka v dapat dihitung.

Michelson dan Morley adalah perintis yang menggunakan contoh sederhana tersebut di atas untuk mencoba mengukur kecepatan aliran eter, bila memang eter itu ada. Perahu A dan perahu B diganti dengan pasangan berkas cahaya yang berasal dari satu sumber, yang satu dipantulkan dan yang lain diteruskan oleh gelas setengah cermin seperti tampak pada **Gambar 9.3**.

Masing-masing berkas cahaya itu dipantulkan oleh cermin C_1 dan C_2 yang letaknya terhadap gelas setengah cermin. Berkas-berkas cahaya ini menggantikan peran perahu A dan B. Apabila kecepatan cahaya itu sebesar 3×10^8 m/s dan kecepatan eter relatif terhadap bumi sama dengan



Gambar 9.3 *Percobaan interferometer Michelson - Merley*

kecepatan tangensial bumi mengelilingi matahari yaitu sebesar 3×10^4 m/s sehingga diharapkan ada selisih waktu antara t_A dan t_B. Adanya selisih waktu itu diharapkan antara gelombang cahaya yang berasal dari pantulan cermin C_1 dan C_2 akan timbul perubahan pola-pola hasil interferensi yang terjadi pada layar pengamatan. Akan tetapi selama percobaan tidak pernah teramati adanya perubahan pola-pola interferensi yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan waktu antara t_A dan t_B.

Berdasarkan percobaan ini Michelson dan Morley menyimpulkan bahwa :

- Hipotesa tentang eter itu tidak benar, eter itu tidak ada.
- Kecepatan cahaya adalah sama untuk ke segala arah, tidak tergantung pada kerangka acuan inersial.

B. Teori Relativitas Einstein

Teori hipotesis eter telah membuktikan secara tidak langsung bahwa eter itu tidak ada. **Albert Einstein** pada tahun 1905 mengusulkan *teori relativitas khusus*. Teori ini bertolak *pada kerangka acuan inersial yaitu kerangka acuan yang bergerak relatif dengan kecepatan konstan terhadap kerangka acuan yang lain*. Sepuluh tahun kemudian pada tahun 1915, Einstein mengemukakan *teori relativitas umum* yang bertolak dari *kerangka acuan yang bergerak dipercepat terhadap kerangka acuan yang lainnya*. Pada bagian berikut ini kita hanya akan mempelajari teori relativitas khusus, sedangkan teori relativitas umum tidak dipelajari pada tingkat SMA.

Dalam mengemukakan teori relativitas khusus ini Einstein mengemukakan dua postulat yaitu :

1. Hukum Fisika dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan yang berbentuk sama pada semua kerangka acuan inersial.
2. Kecepatan cahaya di dalam ruang hampa ke segala arah adalah sama untuk semua pengamat dan tidak tergantung pada gerak sumber cahaya atau pengamat.

Pada postulat yang pertama tersebut menyatakan ketiadaan kerangka acuan universal. Apabila hukum fisika berbeda untuk pengamat yang berbeda dalam keadaan gerak relatif, maka kita dapat menentukan mana yang dalam keadaan "diam" dan mana yang "bergerak" dari perbedaan tersebut. Akan tetapi karena tidak ada kerangka acuan universal, perbedaan itu tidak terdapat, sehingga muncullah postulat ini. Postulat pertama menekankan bahwa prinsip Relativitas Newton berlaku untuk semua rumus Fisika, tidak hanya dalam bidang mekanika, tetapi pada hukum-hukum Fisika lainnya. Sedangkan postulat yang kedua sebagai konsekuensi dari postulat yang pertama, sehingga kelihatannya postulat kedua ini bertentangan dengan teori Relativitas Newton dan transformasi Galileo tidak berlaku untuk cahaya. Dalam postulat ini Einstein menyatakan bahwa selang waktu pengamatan antara pengamat yang diam dengan pengamat yang bergerak relatif terhadap kejadian yang diamati tidak sama ($t \neq t'$). Menurut Einstein besaran kecepatan, waktu, massa, panjang adalah bersifat relatif. Untuk dapat memasukkan konsep relativitas Einstein diperlukan transformasi lain, yaitu *transformasi Lorentz.*

1. Transformasi Lorentz

Pada transformasi Galileo telah dikemukakan bahwa selang waktu pengamatan terhadap suatu peristiwa yang diamati oleh pengamat yang diam dengan pengamat yang relatif bergerak terhadap peristiwa adalah sama. Hal inilah yang menurut Einstein tidak benar, selang waktu pengamatan antara pengamat yang diam dan pengamat yang bergerak relatif adalah tidak sama. Transformasi Lorentz pertama kali dikemukaan oleh **Hendrik A. Lorentz**, seorang fisikawan dari Belanda pada tahun 1895.

Karena waktu pengamatan oleh pengamat yang diam pada kerangka acuan S dan pengamat yang bergerak pada kerangka acuan S′ hubungan transformasi pada Galileo haruslah mengandung suatu tetapan pengali yang disebut *tetapan transformasi*. Sehingga persamaan yang menyatakan hubungan antara koordinat pada kerangka acuan S dan S′ dituliskan sebagai berikut :

Transformasi Lorentz

$$x' = \gamma (x - v.t),\ y' = y,\ z' = z \quad \text{dan} \quad t' \neq t \qquad \text{.... (9.6)}$$

Kebalikan transformasi Lorentz

$$x = \gamma (x' + v.t'),\ y = y',\ z = z' \text{ dan } t \neq t' \qquad \text{.... (9.7)}$$

Faktor pada kedua persamaan di atas adalah sama, karena tidak ada perbedaan antara kerangka S dan S′ dan tidak ada perbedaan antara koordinat y,y' dan z,z'. Hal ini dikarenakan kerangka acuan S′ bergerak ke arah sumbu x positif pada kerangka S dengan kecepatan tetap sebesar v, yang berbeda adalah t dan t', perbedaan ini dapat kita lihat jika kita mensubstitusikan persamaan x' ke dalam perasamaan x sehingga kita dapatkan:

$$x = \gamma (x' + v.t')$$

$$x = \gamma \{(x - v.t) + v.t'\} = \{\gamma (x - v.t) + v.t\}$$

$$x = \gamma (x - v.t) + v.\ t' = \gamma^2\gamma - \gamma^2\ v.t + \gamma\ v.\ t'$$

Dari sini didapatkan :

$$t = \gamma\ t + \frac{(1-\gamma^2)x}{\gamma\ v} \qquad \text{.... (9.10)}$$

di mana γ adalah tetapan transformasi.

Misalkan kecepatan Hasan berjalan terhadap kerangka acuan S′ diganti dengan cahaya yaitu $v_{x'} = c$, maka menurut postulat Einstein yang kedua menyatakan bahwa pengamat pada kerangka acuan S akan mendapatkan $v_x = c$, maka didapatkan bahwa :

$$x = c.t \qquad \text{.... (9.11)}$$

dan

$$x' = c.t' \qquad \text{.... (9.12)}$$

Bila nilai x' dan t' dimasukkan pada persamaan (9.12) didapatkan :

$$\gamma\ (x - v.t) = c\left(\gamma\ t + \frac{(1-\gamma^2)x}{\gamma\ v}\right)$$

$$\gamma\ (x - v.t) = c\gamma\ t + \frac{(1-\gamma^2)cx}{\gamma\ v}$$

Berdasarkan persamaan ini bila yang mengandung nilai x dijadikan satu pada ruas kiri didapat :

$$x = \frac{c\gamma\ t + \gamma\ vt}{\gamma - \left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma\ v}\right)} = ct\left(\frac{\gamma + \frac{v}{c}\gamma}{\gamma - \left(\frac{1-\gamma^2}{\gamma\ v}\right)c}\right) = ct\left(\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\left(\frac{1}{\gamma^2}-1\right)\frac{c}{v}}\right)$$

Karena nilai $x = ct$ maka

$$\left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right) \frac{c}{v}} \right) = 1$$

maka

$$1 + \frac{v}{c} = 1 - \left(\frac{1}{\gamma^2} - 1 \right) \frac{c}{v}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\gamma^2} - 1 \text{ atau}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{.... (9.13)}$$

Sehingga transformasi Lorentz dituliskan menjadi :

$$x' = \frac{x - v.t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v.x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{.... (9.14)}$$

Kebalikan transformasi Lorentz dapat dituliskan menjadi :

$$x = \frac{x' + v.t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t = \frac{t' + \frac{v.x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{.... (9.15)}$$

Maka transformasi Lorentz untuk kecepatan benda yang bergerak dapat dinyatakan :

$$v_{x'} = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d\left(\frac{x - vt}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)}{d\left(\frac{t - \frac{v.x}{c^2}}{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)}$$

$$v_{x'} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{1 - \frac{v\frac{dx}{dt}}{c^2}}$$

$$v_{x'} = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v.v_x}{c^2}} \quad \text{.... (9.16)}$$

Secara analog persamaan transformasi Lorentz balik untuk kecepatan dapat dituliskan :

$$v_x = \frac{v_x{}' + v}{1 + \frac{v.v_x{}'}{c^2}} \quad \text{.... (9.17)}$$

Persamaan (9.16) dan (9.17) merupakan penjumlahan kecepatan transformasi Lorentz yang kemudian dikenal dengan penjumlahan kecepatan menurut teori relativitas Einstein.

Persamaan tersebut di atas merupakan rumus kecepatan benda yang diamati oleh pengamat yang diam yang disebut rumus penambahan kecepatan relativistik yang sesuai dengan teori relativitas Einstein.

Sekarang mari kita uji dengan menggunakan kejadian-kejadian yang kita alami dalam kehidupan kita.

a. Bila $v_{x'} = 0$ maka $v_x = v$ ini cocok dengan kejadian dalam kehidupan kita, jika penumpang kereta api diam kecepatan penumpang terhadap tanah sama dengan kecepatan kereta api terhadap tanah.
b. Bila $v = 0$ maka $v_x = v_{x'}$ hal ini juga sesuai yang kita harapkan, yaitu jika kereta api diam, maka kecepatan penumpang terhadap tanah sama dengan kecepatan penumpang terhadap kereta api.
c. Bila v dan $v_{x'}$ sangat kecil dibandingkan kecepatan cahaya maka $v_x = v_{x'} + v$ hal ini sesuai dengan rumus kecepatan dalam transformasi Galileo.
d. Bila $v_{x'} = c$ dan $v = c$ maka diperoleh nilai $v_x = c$, hal ini sesuai dengan postulat Einstein yang kedua.

Ternyata rumus pertambahan kecepatan relativistik yang diturunkan dari transformasi Lorentz tidak bertentangan dengan kecepatan relativistik.

Contoh Soal

Sebuah pesawat tempur yang bergerak dengan kecepatan 0,8 c relatif terhadap bumi menembakkan roket dengan kecepatan 0,6 c. Berapakah kecepatan roket tersebut menurut pengamat yang diam di bumi?

Penyelesaian :

Diketahui : $v = 0{,}8\ c$

$v_{x'} = 0{,}6\ c$

Ditanyakan : $v_x = ?$

Jawab : $v_x = \dfrac{v_{x'} + v}{1 + \dfrac{v.v_{x'}}{c^2}}$

$$v_x = \frac{0{,}6c + 0{,}8c}{1 + \dfrac{0{,}6c \,.\, 0{,}8c}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{1{,}4c}{1 + 0{,}48c} = 0{,}946\ c$$

Soal Latihan

1. Dua buah pesawat A dan B bergerak saling mendekati bumi dari arah yang berlawanan dengan kecepatan masing-masing 0,6c dan 0,8c relatif terhadap bumi. Berapakah kecepatan pesawat A menurut pilot pesawat B?
2. Dua buah pesawat A dan B bergerak dalam arah yang sama dengan kecepatan masing-masing 0,4 c dan 0,6c relatif terhadap bumi. Berapakah kecepatan :
   a. pesawat B menurut pilot di pesawat A?
   b. pesawat A menurut pilot pesawat B?

2. Dilatasi Waktu

Dalam mengemukakan teori relativitas khusus, Einstein menyatakan bahwa waktu pengamatan antara pengamat yang diam dengan pengamat yang bergerak relatif terhadap kejadian/peristiwa adalah tidak sama. Selang waktu yang diukur oleh jam yang relatif bergerak terhadap kejadian dengan jam yang diam terhadap kejadian, waktu yang diukur jam yang bergerak lebih besar dibandingkan waktu yang diukur oleh jam yang diam terhadap kejadian. Peristiwa ini disebut *dilatasi waktu atau pemuaian waktu (time dilatation)* yang dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{.... (9.18)}$$

di mana :

Δt_o = selang waktu yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian,

Δt = selang waktu yang diukur oleh pengamat yang bergerak terhadap kejadian,

v = kecepatan relatif pengamat terhadap kejadian yang diamati, dan

c = kecepatan cahaya.

Contoh Soal

Sebuah partikel berumur 10^{-7} s jika diukur dalam keadaan diam. Berapa jauh partikel itu bergerak sebelum meluruh jika kelajuannya 0.9c ketika partikel tersebut tercipta?

Penyelesaian :

Diketahui : $\Delta t_o = 10^{-7}$ s $c = 3 \times 10^8$ ms^{-1}

$v = 0{,}9$ c

Ditanyakan : x = ...? (jarak yang ditempuh partikel)

Jawab : Karena partikel bergerak dengan kecepatan 0,9 c maka umur partikel tersebut adalah :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$= \frac{10^{-7}}{\sqrt{1-\frac{(0{,}9c)^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{10^{-7}}{\sqrt{1-0{,}81}}$$

$$= \frac{10^{-7}}{\sqrt{0{,}19}} = \frac{10^{-7}}{0{,}44}$$

$= 2{,}27 \times 10^{-7}$s

Jadi, partikel tersebut bergerak sejauh:

$x = v \times \Delta t$

$= 0{,}9 \times 3 \times 10^8 \times 2{,}27 \times 10^{-7}$ m

$= 61{,}29$ m

Soal Latihan

1. Berapa kelajuan pesawat angkasa bergerak relatif terhadap bumi supaya waktu sehari dalam pesawat sama dengan 2 detik di bumi?
2. Berapakah kelajuan pesawat angkasa yang loncengnya berjalan 15 detik lebih lambat tiap jamnya relatif terhadap lonceng di Bumi?

3. Kontraksi Lorentz

Pengukuran panjang seperti juga selang waktu dipengaruhi oleh gerak relatif. Panjang L benda yang bergerak terhadap pengamat kelihatannya lebih pendek L_o bila diukur dalam keadaan diam terhadap pengamat. Peristiwa ini disebut *kontraksi Lorentz (pengerutan Lorentz)*. Kontraksi Lorentz dinyatakan dalam persamaan :

$$L = L_o\left(\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\right) \qquad \text{.... (9.19)}$$

di mana :

L_o = panjang benda diukur oleh pengamat yang diam
L = panjang benda yang diukur oleh pengamat yang bergerak
v = kecepatan benda relatif terhadap pengamat yang diam
c = kecepatan cahaya

Contoh Soal

Sebuah pesawat panjangnya 10 meter dalam keadaan diam. Apabila pesawat tersebut bergerak searah dengan panjangnya dengan kecepatan 0,6c. Berapakah panjang pesawat tersebut saat bergerak?

Penyelesaian :

Diketahui : L_o = 10 m

v = 0,6 c

Ditanyakan : L = ... ?

Jawab : $L = L_o\left(\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}\right)$

$= 10\sqrt{1-\frac{(0{,}6c)^2}{c^2}}$

$= 10\sqrt{1-0{,}36}$

$= 10\sqrt{0{,}64}$

$= 10 \cdot 0{,}8$

$= 8$ meter

Soal Latihan

1. Berapakah kecepatan pesawat harus bergerak agar panjang pesawat dalam keadaan bergerak menjadi ¾ panjang diamnya?
2. Berapakah panjang pesawat yang bergerak dengan kecepatan 0,8 c bila panjang pesawat dalam keadaan diamnya 8 meter.

4. Massa Relativitas

Menurut teori fisika klasik atau mekanika Newton bahwa massa benda konstan, massa benda tidak tergantung pada kecepatan benda. Akan tetapi menurut teori relativitas Einstein, massa benda adalah besaran relatif yang besarnya dipengaruhi kecepatan benda. Massa benda yang bergerak dengan kecepatan v relatif terhadap pengamat menjadi lebih besar daripada ketika benda itu dalam keadaan diam. Massa benda yang bergerak dengan kecepatan v secara teori relativitas dinyatakan :

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{.... (9.20)}$$

di mana :

m_o = massa benda dalam keadaan diam

m = massa relativitas

v = kecepatan benda relatif terhadap pengamat

c = kecepatan cahaya

Dari persamaan (9.20) tersebut di atas, kecepatan benda makin besar maka makin besar pula massa kelembaman benda. Jika nilai v jauh di bawah nilai c, maka nilai $\frac{v^2}{c^2}$ akan mendekati nilai 0 sehingga nilai $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1$ maka $m = m_o$, tetapi jika nilai v mendekati nilai c maka nilai $\frac{v^2}{c^2}$ akan mendekati nilai 1 sehingga nilai $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ mendekati 0, akibatnya nilai m menjadi tak terhingga. Akibatnya makin sulit benda itu dipercepat, sehingga kecepatan benda itu akan mencapai nilai yang konstan. Sehingga tidak ada benda/partikel yang bergerak dengan kecepatan melebihi kecepatan cahaya.

Contoh Soal

Tentukan berapa kecepatan benda bergerak ketika massa relativitasnya 25 % lebih besar dari massa diamnya!

Penyelesaian :

Diketahui : $m = 125\ \%\ m_o$

Ditanyakan : $v = ...\ ?$

Jawab : $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_o}{m} = \frac{100}{125} = \frac{4}{5}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{16}{25}$$

$$1 - \frac{16}{25} = \frac{v^2}{c^2}$$

$$v^2 = \frac{9}{25}c^2 \text{ atau } v = \frac{3}{5}c = 0{,}6\ c$$

Jadi kecepatan benda adalah 0,6 c.

Soal Latihan :

1. Tentukan besarnya energi kinetik suatu partikel yang massanya 5 μgr apabila bergerak dengan kecepatan sebesar 0,6 c!
2. Berapa kali massa diam sebuah elektron yang bergerak dengan kecepatan 0,8 c?

Wawasan Produktivitas : Kewirausahaan

Dalam menyatakan kedudukan suatu benda yang diamati oleh orang yang diam terhadap kejadian (peristiwa) dengan orang yang bergerak terhadap kejadian pada relativitas Newton digunakan transformasi Gallileo. Sedangkan pada relativitas Einstein menggunakan transformasi Lorentz. Coba jelaskan apakah perbedaan yang mendasar antara transformasi Gallileo dengan transformasi Lorentz tersebut!

5. Hubungan antara Massa dan Energi Relativitas

Usaha yang dikerjakan oleh sebuah gaya sebesar F pada sebuah benda yang mula-mula diam sehingga menjadi bergerak dengan kecepatan v dinyatakan sama dengan perubahan energi kinetik benda tersebut atau sama dengan perubahan momentum yang terjadi pada benda. Dalam teori relativitasnya bahwa massa benda bersifat relatif, maka penulisan rumus untuk hukum Newton ke dua Newton perlu disempurnakan menjadi :

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

Jika F menyatakan gaya yang bekerja pada benda dalam arah perpindahan ds dan s menyatakan jarak yang ditempuh selama gaya itu bekerja, maka besarnya energi kinetik benda dapat dinyatakan :

$$Ek = \int_0^s F.ds = \int_0^s \frac{d(mv)}{dt}.ds = \int_0^{mv} v(dmv) = \int_0^v v.d\left(\frac{m_o v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right)$$

Apabila persamaan integral tersebut diselesaikan akan mendapat :

$$Ek = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_o c^2 = mc^2 - m_o c^2 \qquad \text{.... (9.21)}$$

Dengan mc^2 menyatakan energi total benda yang dilambangkan E dan $m_o c^2$ menyatakan energi yang dimiliki benda saat diamnya yang dilambangkan E_o, maka dapat dituliskan menjadi :

$$E = E_o + Ek$$

Dimana : E = Energi total benda = $mc^2 = \dfrac{m_o c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

E_o = Energi diam benda = $m_o c^2$

E_k = Energi kinetik benda

Contoh Soal

Hitunglah energi kinetik sebuah elektron yang bergerak dengan kecepatan 0,6 c, bila diketahui $m_o = 9.10^{-31}$ kg, $c = 3.10^8$ m/s.

Penyelesaian :

Diketahui : $m_o = 9.10^{-31}$ kg

$v = 2.10^6$ m/s

$c = 3.10^8$ m/s

Ditanyakan : $Ek = ...?$

Jawab : $Ek = m_o c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$

$$= 9.10^{-31}.(3.10^8)^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{(c)^2}}} - 1 \right)$$

$$= 81.10^{-15} \left(\frac{1}{\sqrt{0,64}} - 1 \right)$$

$$= 81.10^{-15}\ (1,25 - 1)$$

$$= 81.10^{-15}\ .\ 0,25$$

$$= 20,25.10^{-15}\ \text{J}$$

$$= \frac{20,25.10^{-15}}{1.6.10^{-19}}\ \text{eV}$$

$$= 126.562,5\ \text{eV}$$

$$= 0,13\ \text{MeV}$$

Jadi, energi kinetik elektron tersebut sama dengan 0,13 MeV.

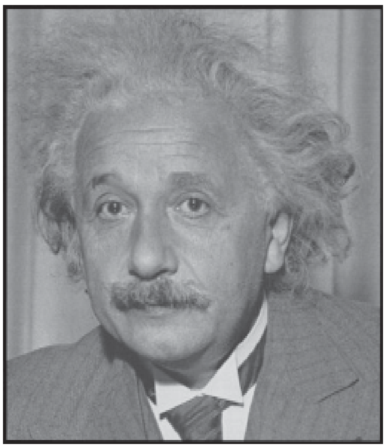
Soal Latihan :

1. Tentukan berapa kecepatan elektron bergerak agar energi kinetiknya $\frac{1}{2}$ energi diamnya!
2. Tentukan berapa kecepatan elektron bergerak agar massa relativitasnya 1,25 massa diamnya!

Keingintahuan : Mencari Informasi

Carilah lebih lanjut informasi mengenai fenomena-fenomena di alam ini yang ada kaitannya dengan konsep relativitas dari buku-buku referensi atau melalui internet. Misalnya mengenai mungkinkah pada saat ini para ahli dapat membuat sebuah pesawat yang dapat bergerak mendekati kecepatan cahaya? Peristiwa apa yang terjadi di alam ini yang bisa menunjukkan adanya dilatasi waktu? Buatlah ringkasan atau ulasan dari hasil bacaan yang telah kau lakukan dan kemudian presentasikan di depan kelas!

Seputar Tokoh



Albert Einstein (1879-1955)

Dilahirkan di Ulm, Jerman. Ia sangat tidak senang pada sekolah-sekolah di Jerman yang disiplin secara kaku pada saat itu. Oleh karena itu, pada usia 16 tahun ia pindah ke negeri Swiss untuk melanjutkan pelajarannya, kemudian ia memperoleh pekerjaan sebagai orang yang memeriksa pemohon paten pada *Swiss Petent Offise* (Kantor Paten Swiss) di Berne. Banyak gagasan-gagasan dan pemikirannya yang telah mengubah pemikiran, bukan hanya dalam Fisika melainkan juga dalam peradaban modern ini. Pada tahun 1905 ia mengemukakan tiga teorinya, yaitu pertama bahwa cahaya mempunyai sifat dualisme yaitu cahaya sebagai partikel dan gelombang, yang kedua adanya gerak Brown (gerak zigzag) dari sebintik bahan yang terapung dalam fluida, dan yang ketiga adalah memperkenalkan teori relativitas khusus. Sepuluh tahun kemudian ia mengemukakan teori relativitas umum yang mengaitkan gravitasi dengan ruang dan waktu. *Sumber : wikipedia*

Ringkasan

1. Relativitas Newton membicarakan gerak benda yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan cahaya yang dinyatakan dalam persamaan:

   $v_x{}' = v_x - v$ atau $v_x = v_x{}' + v$

2. Relativitas Einstein yaitu membicarakan benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, menurut Einstein kecepatan benda dinyatakan :

   $$v_{x'} = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v.v_x}{c^2}} \text{ atau } v_x = \frac{v_x{}' + v}{1 + \frac{v.v_x{}'}{c^2}x}$$

3. Pengukuran panjang suatu benda apabila dilakukan dengan bergerak akan selalu menghasilkan hasil pengukuran yang lebih pendek dibandingkan dengan pengukuran dalam keadaan diam. Pengerutan hasil pengukuran ini disebut konstraksi Lorentz yang dinyatakan $L = L_o\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)$.

4. Menurut Einstein bahwa massa benda tidak selalu tetap melainkan bersifat relatif, massa benda akan berubah semakin besar apabila benda tersebut bergerak semakin mendekati kecepatan cahaya, massa relatif benda dinyatakan :

   $$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. Antara massa dan energi menurut Einstein saling berhubungan, di mana kesetaraan antara massa benda dengan energi dinyatakan : $E = mc^2$.

6. Energi kinetik yang dimiliki oleh sebuah benda menurut Einstein adalah selisih antara energi total dengan energi diamnya yang bisa dinyatakan :

   $$Ek = m_o c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Hipotesis eter dari Huygens sebagai medium rambatan gelombang cahaya tidak benar, percobaan yang membuktikan tidak adanya eter adalah ....
   A. percobaan Compton
   B. percobaan Davidsone dan Germer
   C. percobaan Michelson dan Morley
   D. percobaan Loretz
   E. percobaan Galileo

2. Postulat kedua dari Einstein menyatakan bahwa ....
   A. Semua hukum-hukum Fisika dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan yang sama untuk semua kerangka acuan universal
   B. Hasil pengukuran waktu yang dilakukan oleh pengamat yang bergerak dengan pengamat yang diam adalah sama
   C. Kecepatan gelombang cahaya adalah sama untuk semua pengamat dan tidak tergantung pada gerak si pengamat atau gerak sumber cahaya
   D. Pengukuran panjang benda yang dilakukan oleh pengamat yang diam dan bergerak menghasilkan hasil yang tidak sama.
   E. Massa benda bersifat relatif yang berarti massa sebuah benda berubah yang besarnya bergantung pada kecepatan benda bergerak.

3. Periode suatu pendulum di muka bumi besarnya 3,0 detik. Bila pendulum tersebut diamati oleh seseorang yang bergerak relatif terhadap bumi dengan kecepatan 0,95 c (c = kecepatan cahaya), maka periode pendulum tersebut dalam detik menjadi ....
   (UMPTN 1999 Rayon A)
   A. 0,5
   B. 1,5
   C. 9.6
   D. 15
   E. 300

4. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan 0,8 *c*. Apabila diamati oleh pengamat yang diam, panjang roket itu akan menyusut sebesar ....
   A. 20%
   B. 36%
   C. 40%
   D. 60%
   E. 80%

5. Sebuah partikel bergerak dengan kecepatan 0,6 *c*, maka massa partikel tersebut selama geraknya adalah ....
   A. 0,8 m_o
   B. 1,0 m_o
   C. 1,25 m_o
   D. 1,50 m_o
   E. 1,66 m_o

6. Sebuah roket di bumi mempunyai panjang 100 m, roket tersebut bergerak dengan kecepatan 0,8 *c*, menurut seorang pengamat yang tinggal di bumi panjang roket tersebut menjadi ....
   A. 50 m
   B. 60 m
   C. 70 m
   D. 80 m
   E. 100 m

7. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan 0,8 *c* (*c* = kecepatan rambat cahaya) dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan ½ *c* adalah ....
   A. 1 : 2
   B. 1 : $\sqrt{3}$
   C. $\sqrt{3}$: 1
   D. 2 : 3
   E. 3 : 2

8. Menurut orang yang tinggal di bumi jarak antara planet X dengan bumi adalah 20 tahun cahaya, tetapi jarak antara planet X dengan bumi menurut pengamat yang berada dalam pesawat angkasa yang bergerak dengan kecepatan 0,6 c adalah ....
   A. 10 tahun cahaya
   B. 14 tahun cahaya
   C. 16 tahun cahaya
   D. 18 tahun cahaya
   E. 20 tahun cahaya

9. Besarnya energi kinetik sebuah partikel yang bergerak mendekati kecepatan cahaya menurut relativitas Einstein dinyatakan ....
   A. ½ mv^2
   B. $mc^2 + m_oc^2$
   C. $m_oc^2 - mc^2$
   D. $mc^2 - m_oc^2$
   E. ½ mc^2 – ½ m_oc^2

10. Sebuah benda mempunyai massa 2 gram. Jika benda tersebut bergerak dengan kecepatan 0,6 c dan cepat rambat cahaya $c = 3.10^8$ ms^{-1}, maka energi kinetik benda itu adalah ....
   A. $2{,}25 \times 10^{13}$ J
   B. $3{,}25 \times 10^{13}$ J
   C. $4{,}00 \times 10^{13}$ J
   D. $4{,}50 \times 10^{13}$ J
   E. $5{,}00 \times 10^{13}$ J

B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!

1. Amir berjalan di dalam gerbong kereta api dengan kecepatan 5 km/jam. Apabila kereta api itu bergerak dengan kecepatan 75 km/jam, berapa kecepatan Amir berjalan menurut :
   a. relativitas Einstein,
   b. relativitas Newton.

2. Berapakah kecepatan benda bergerak agar panjang benda yang diamati oleh orang yang diam menjadi 4/5 panjang diamnya?
3. Sebuah jam memiliki periode ayunannya 1 s. Tentukan berapa kecepatan jam itu bergerak agar periode ayunannya menjadi 1,25 s!
4. Suatu partikel bergerak apabila energi kinetiknya sama dengan setengah energi diamnya. Tentukan berapa kecepatan partikel itu bergerak!
5. Apabila massa 1 gram benda berubah seluruhnya menjadi energi dalam satu detik, hitunglah berapa MW daya yang dihasilkan!

Refleksi

Setelah mempelajari bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. teori relativitas untuk waktu, panjang, dan massa, dan
2. formulasi kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

Apabila kalian belum memahami isi materi pada bab ini, pelajari kembali sebelum kalian melanjutkan ke bab berikutnya.

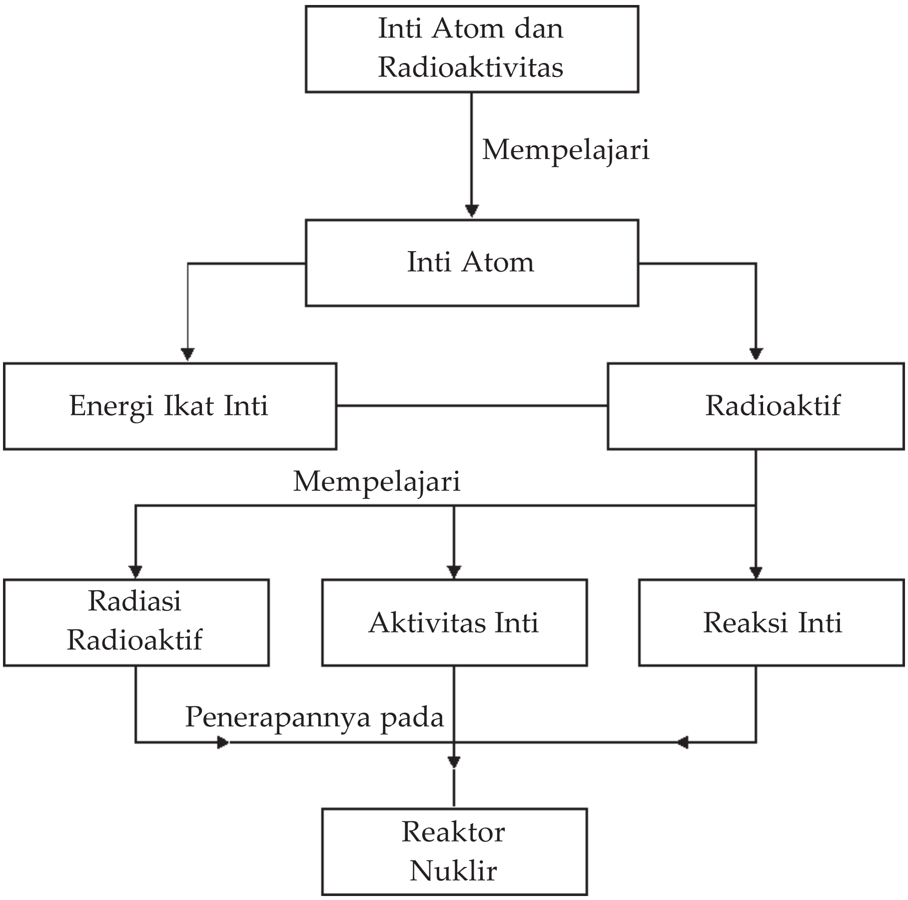
Bab X
Inti Atom dan Radioaktivitas



Sumber : www.picture.newsletter.com

Teknologi nuklir merupakan energi masa depan yang harus diperhatikan dan dikembangkan mulai sekarang. Manfaat nuklir yang sangat besar bagi manusia harus dikembangkan dan dikelola dengan benar. Pengelolaan energi dan pengelolaan limbah yang dikeluarkan dapat meminimalkan efek yang ditimbulkan sehingga tidak berbahaya bagi manusia.

Peta Konsep



Tujuan Pembelajaran :

Setelah mempelajari bab ini, kalian diharapkan mampu :

1. mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas, dan
2. mendeskripsikan pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Motivasi Belajar

Dewasa ini perkembangan teknologi nuklir terjadi sangat pesat. Isotop radioaktivitas telah banyak dipergunakan untuk berbagai keperluan dalam bidang penelitian maupun dalam bidang industri, pertanian, kedokteran, dan kelautan.

Pada bab ini akan dipelajari tentang inti atom dan radioaktivitas sampai pada pemanfaatan energi yang dihasilkannya. Untuk memahaminya maka pelajarilah materi bab ini dengan saksama!

Kata-kata Kunci

inti atom, radioaktif, waktu paruh, energi ikat, gaya inti, reaksi fusi, reaktor atom

A. Inti Atom

Konsep adanya inti atom pertama kali dinyatakan oleh Rutherford dari hasil serangkaian eksperimennya untuk menguji model atom yang dikemukakan oleh Thomson dengan percobaan yang terkenal dengan nama hamburan Rutherford. Dari eksperimen ini Rutherford menyimpulkan bahwa massa seluruh atom terkumpul pada suatu titik yang disebut inti atom yang bermuatan positif. Muatan positif yang terdapat pada inti atom sama dengan jumlah muatan elektron yang bergerak mengelilingi inti. Partikel yang bermuatan positif dalam inti atom disebut *proton*. Kemudian ditemukan-nya *neutron* oleh James Chadwich yang juga merupakan partikel yang ada dalam inti atom tetapi tidak bermuatan (netral).

Dengan demikian inti atom tersusun oleh dua partikel yaitu *proton* dan *neutron*, proton bermuatan positif sedang-kan neutron netral yang selanjutnya proton dan neutron ini disebut *nukleon* atau *nuklida*.

Massa neutron hampir sama dengan proton, hanya saja massa neutron lebih besar sedikit dibandingkan massa proton. Ukuran inti atom berkisar pada 10^{-15} m, sehingga massa partikelnya sangat kecil. Satuan massa untuk inti atom dipakai satuan massa atom yang disingkat *sma* di mana 1 sma = $1,6604 \times 10^{-27}$ kg. 1 sma didefinisikan sama dengan $\frac{1}{12}$ massa atom $_6C^{12}$.

Inti atom dilambangkan $_{Z}X^{A}$ dengan X menyatakan nama inti atom, *Z menyatakan nomor atom*, dan *A menyatakan nomor massa atom*. Misalnya inti atom karbon memiliki nomor atom 6 sedangkan nomor massanya 12, maka lambang atom karbon tersebut dituliskan $_{6}C^{12}$. *Nomor atom menyatakan jumlah proton dalam inti atom atau jumlah elektron yang mengelilingi inti dan nomor massa menyatakan jumlah proton dan neutron yang terdapat pada inti atom atau jumlah nukleon.*

1. Gaya Ikat Inti

Telah diketahui bahwa inti atom terdiri atas proton dan neutron, padahal antara proton dan neutron adalah bermuatan positif dan netral. Menurut hukum Coulomb, hal tersebut akan menimbulkan gaya elektrostatis, yaitu berupa gaya tolak-menolak. Akan tetapi mengapa proton-proton tersebut dapat menyatu di dalam inti atom.

Sebenarnya dalam inti atom terdapat interaksi gaya gravitasi dan gaya elektrostatis, akan tetapi gaya gravitasi dapat diabaikan terhadap gaya elektrostatis. Jadi pasti ada gaya lain yang menyebabkan proton-proton dalam inti atom dapat menyatu. Gaya yang menyebabkan nulkeon bisa bersatu di dalam inti disebut *gaya ikat inti*. Gaya gravitasi menyebabkan gaya tarik-menarik antarmassa nukleon, yaitu proton dengan proton, proton dengan neutron, atau neutron dengan neutron, sedangkan gaya elektrostatis menyebabkan gaya tolak-menolak antara muatan proton dan proton. Gaya ikat inti lebih besar dibandingkan gaya gravitasi dan gaya elektrostatis.

Gaya ikat inti bekerja antara proton dengan proton, proton dengan neutron, atau neutron dengan neutron. Gaya ikat inti bekerja pada jarak yang sangat dekat sampai dengan jarak pada diameter inti atom (10^{-15} m).

2. Energi Ikat Inti

Hubungan antara massa inti atom dengan energi ikat inti dapat dijelaskan dengan teori yang dikemukakan oleh Albert Einstein yang menyatakan hubungan antara massa dan energi yang dinyatakan dalam persamaan $E = mc^2$. Di mana E adalah energi yang timbul apabila sejumlah m (massa) benda berubah menjadi energi dan c adalah cepat rambat gelombang cahaya.

Dari hasil pengukuran massa inti atom selalu lebih kecil dari jumlah massa nukleon pada inti atom tersebut, penyusutan/pengurangan massa ini disebut *defek massa*. Besarnya penyusutan massa inti akan berubah menjadi energi ikat inti

yang menyebabkan nukleon dapat bersatu dalam inti atom. Besarnya energi ikat inti dapat diketahui jika besarnya defek massa inti diketahui. Besarnya defek massa dinyatakan dengan selisih jumlah massa seluruh nukleon (massa proton dan neutron) dengan massa inti yang terbentuk yang dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\Delta m = \left(Zm_p + (A - Z)m_n\right) - m_{inti} \qquad \text{.... (10.1)}$$

dengan :

Δm = defek massa

m_p = massa proton

m_n = massa neutron

Z = jumlah proton dalam inti atom

$(A - Z)$ = jumlah neutron pada inti atom

Menurut hasil pengukuran yang teliti jika massa 1 sma berubah menjadi energi setara dengan energi sebesar 931 MeV (Mega elektron volt) atau 1 sma = 931 MeV, sehingga besarnya energi ikat inti dapat dinyatakan :

$$\Delta E = \Delta m \times 931\ MeV \qquad \text{.... (10.2)}$$

dengan :

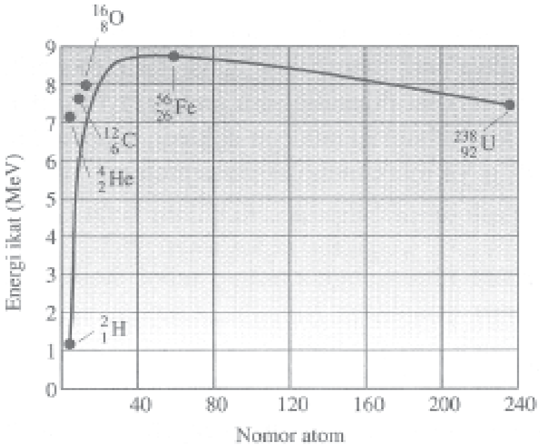
Δm = defek massa

ΔE = energi ikat inti

Apakah energi ikat inti selalu dapat menggambarkan tingkat kestabilan inti atom? Ternyata tidak selalu. Jika inti memiliki jumlah nukleon yang banyak energi ikatnya juga besar. Namum belum tentu inti tersebut stabil. Pada umumnya inti atom yang mempunyai jumlah neutron lebih banyak mempunyai tingkat kestabilan inti yang lebih rendah. Ada besaran yang mempunyai korelasi / hubungan dengan tingkat kestabilan inti yang disebut *tingkat energi ikat per nukleon* yaitu energi ikat inti dibagi dengan jumlah nukleon pada inti tersebut yang dinyatakan dalam persamaan :

$$\textit{Energi ikat pernukleon} = \frac{\Delta E}{A} \qquad \text{.... (10.3)}$$

dengan A menyatakan nomor massa.



Sumber: Fisika 3B Bob Foster

Gambar 10.1 *Grafik hubungan antara energi ikat per nukleon dengan nomor atom.*

Gambar 10.1 memperlihatkan grafik energi ikat per nukleon terhadap banyaknya nukleon dalam berbagai inti atomik. Pada grafik itu energi ikat terbesar adalah 8,8 MeV yaitu pada inti atom besi ($_{26}$ Fe^{56}). Lebih besar energi ikat penukleon-nya, maka lebih mantap inti itu.

Contoh Soal

Hitung defek massa dan energi ikat per nukleon dari inti $^{238}_{92}$U, bila diketahui massa atom $^{238}_{92}$U= 238,05076 sma, massa neutron = 1.00867 sma dan massa proton = 1,00728 sma!

Penyelesaian :

Diketahui : m_{inti} = 238,05076 sma

m_p = 1,00728 sma

m_n = 1,00867 sma

Ditanyakan : a. Δm = ...?

b. Energi ikat per nukleon?

Jawab :

a. $\Delta m = \{(Zm_p + (A - Z)\ m_n - m_{inti})$

Untuk atom $^{238}_{92}$U maka nilai Z = 92 dan

(A - Z) = (238 – 92) = 146

Δm = {(92 (1,00728) + 146 (1,00867) – 238,05076} sma

= {(92,66976 + 147,26582) – 238,05076} sma

= {239,93558 – 238,05076} sma

= 1,88482 sma

Jadi, defek massanya adalah 1,88482 sma.

b. $\Delta E = \Delta m$. 931,5 Mev
$= 1{,}88482 \ . \ 931{,}5$ MeV
$= 1755{,}7098$ MeV

Energi ikat per nukleon $= \frac{\Delta E}{A} = \frac{1755{,}7098}{238}$
$= 7{,}38$ MeV

Jadi, energi ikat per nukleon adalah 7,38 MeV.

Soal Latihan :

1. Hitunglah besarnya defek massa dan energi ikat per nukleon dari $^{60}_{28}Ni$, bila diketahui massa inti atom Ni = 59,915 sma, massa netron = 1.00867 sma, dan massa proton = 1,00728 sma!
2. Hitunglah defek massa dari isotop $^{18}_{8}O$, bila diketahui massa inti $^{18}_{8}O$ = 18,004883 sma, massa netron = 1.00867 sma, dan massa proton = 1,00728 sma!

B. Radioaktivitas

Inti atom yang memiliki nomor massa besar memiliki energi ikat inti yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan nomor massa menengah. Kecenderungan inti atom yang memiliki nomor massa besar misalnya uranium 235 kecenderungan tidak stabil akan memancarkan energi dalam bentuk sinar radioaktif. Pengamatan tentang aktivitas inti dimulai dari **Henry Becquerel** yang menyelidiki tentang gejala fosforesensi dan fluoresensi. *Fosforesensi* yaitu peristiwa berpendarnya zat setelah cahaya yang menyinari zat tersebut dihentikan, sedangkan *fluoresensi* yaitu peristiwa berpendarnya zat pada saat zat tersebut mendapatkan sinar. Dalam penyelidikan Becquerel, unsur uranium selalu memancarkan sinar radiasi meskipun unsur tersebut disimpan di tempat yang tidak terkena cahaya dalam waktu yang lama. Sinar radiasi berasal dari dalam inti atom. Selanjutnya **Piere Curie** dan **Marie Curie** menyelidiki sinar radiasi yang berasal dari inti atom, yang kemudian menemukan dua unsur yang selalu memancarkan sinar radiasi yang kemudian dinamakan

Poloniun dan *Radium*. Unsur yang selalu memancarkan sinar radiasi tersebut dinamakan *unsur radioaktif (isotop radioaktif)*.

Inti atom yang tidak stabil selalu memancarkan secara spontan sinar radioaktif, sehingga akhirnya akan diperoleh inti atom yang stabil. Peristiwa pemancaran sinar radioaktif secara spontan disebut *radioaktivitas* atau *peluruhan radioaktif*.

1. Sinar Radioaktif

Isotop radioaktif yang mampu memancarkan sinar radioaktif kebanyakan adalah unsur-unsur yang mempunyai nomor massa besar, yaitu lebih dari 200. Pemancaran sinar radioaktif dibedakan menjadi tiga, yaitu sinar α, β, dan γ. Pemancaran sinar radioaktif tersebut akan menyebabkan terjadinya perubahan nukleon pada inti atom sehingga inti atom akan berubah menjadi inti atom yang lain. Inti atom sebelum terjadi peluruhan disebut *inti induk* dan inti atom yang terjadi setelah peluruhan disebut *inti anak*. Jika inti anak yang terbentuk masih bersifat radioaktif, akan secara spontan meluruh sehingga akhirnya akan diperoleh inti yang stabil.

a. Pemancaran Sinar α

Suatu inti atom radioaktif yang memancarkan sinar α akan menyebabkan nomor atom inti induk berkurang dua dan nomor massa induk berkurang empat sehingga berubah menjadi inti atom yang lain. Sinar α sebenarnya merupakan pemancaran partikel yang terdiri atas dua proton dan dua neutron yang merupakan partikel yang bermuatan positif yang memiliki massa 4 kali massa proton yang diberi lambang ${}_2\alpha^4$ atau ${}_2He^4$.

Contoh peluruhan sinar α yaitu :

1) ${}_{92}U^{235} \rightarrow {}_{90}Th^{231} + {}_2He^4$

2) ${}_{88}Ra^{224} \rightarrow {}_{84}Rn^{220} + {}_2He^4$

b. Pemancaran Sinar β

Isotop radioaktif jika memancarkan sinar β, maka akan menyebabkan nomor atom inti induk nomor massa tetap sedangkan nomor atomnya bertambah satu sehingga berubah menjadi inti atom yang lain. Sinar β sebenarnya merupakan pancaran elektron dari inti atom karena perubahan neutron menjadi proton dan diberi lambang ${}_{-1}e^0$

Contoh peluruhan sinar β yaitu :

1) ${}_{91}Pa^{233} \rightarrow {}_{92}U^{233} + {}_{-1}e^0$

2) ${}_{89}Ac^{227} \rightarrow {}_{90}Th^{227} + {}_{-1}e^0$

c. Pemancaran Sinar γ

Sebuah inti atom dapat memiliki energi ikat nukleon yang lebih tinggi dari energi ikat dasarnya (*ground state*). Dalam keadaan ini dikatakan inti atom dalam keadaan *tereksitasi* dan dapat kembali ke keadaan dasar dengan memancarkan sinar *gamma* atau *foton* yang besarnya energi tergantung pada keadaaan *energi tereksitas*i dengan *energi dasarnya*. Pemancaran sinar tidak menyebabkan perubahan massa dan muatan pada inti atom. Inti atom yang dalam keadaan tereksitasi diberi tanda bintang setelah lambang yang biasanya dipakai, misal $_{38}Sr^{*\,87}$.

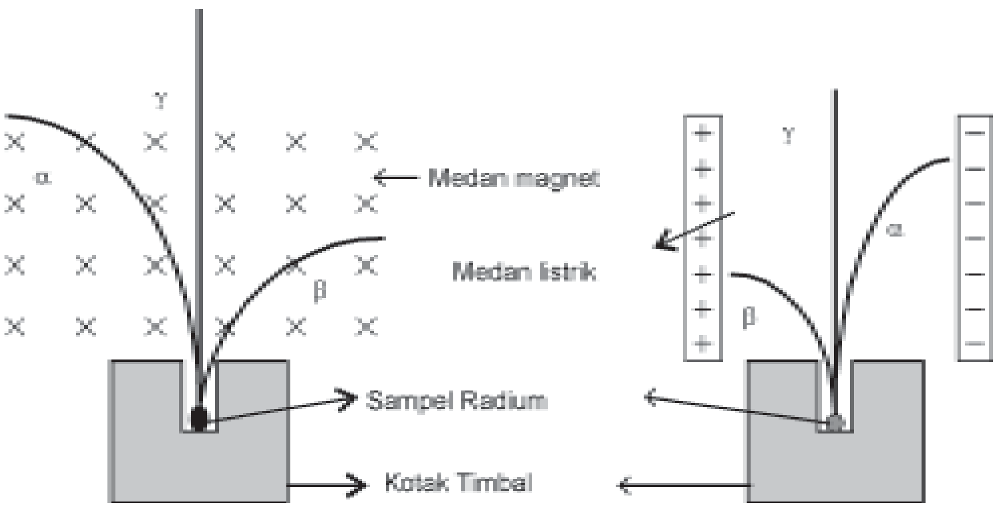
Contoh peluruhan sinar γ yaitu:

1) $_6C^{*12} \rightarrow {}_6C^{12} + \gamma$

2) $_{28}Ni^{*61} \rightarrow {}_{28}Ni^{61} + \gamma$

Dari hasil penelitian lebih lanjut dari sifat-sifat sinar radioaktif menunjukkan bahwa jika dilihat dari sifat *daya ionisasinya* (sifat kimianya) menunjukkan bahwa sinar α memiliki daya ionisasi paling kuat, baru kemudian sinar β, dan sinar γ. Sedangkan sifat fisikanya : yaitu sinar γ memiliki daya tembus yang paling kuat, baru kemudian sinar β dan sinar α. Apabila sinar radioaktif tersebut dilewatkan dalam medan magnet atau medan listrik, ternyata sinar α dan β terpengaruh oleh medan tersebut, sedangkan sinar γ tidak terpengaruh oleh medan listrik dan medan magnet. Sinar β dibelokkan lebih tajam dibandingkan dengan sinar α.

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar di bawah ini.



Gambar 10.2 *Pembelokan radiasi α, β, dan γ oleh medan magnetik*

2. Aktivitas Inti Radioaktif

Inti atom radioaktif adalah inti yang tidak stabil, yaitu secara spontan memancarkan sinar radioaktif (α, β, *dan* γ). Akibat pemancaran sinar ini menyebabkan jumlah inti makin lama makin berkurang (meluruh). Laju perubahan inti atom radioaktif yang meluruh tiap satu satuan waktu disebut *aktivitas inti* yang besarnya tidak dipengaruhi oleh faktor luar, misalnya tekanan dan suhu melainkan hanya dipengaruhi oleh banyaknya inti atom radioaktif. Makin banyak inti atomnya, semakin tinggi aktivitas inti, makin sedikit inti atomnya, makin kecil aktivitas intinya. Peluruhan menyebabkan inti atom berkurang, sehingga aktivitas intinya pun berkurang sesuai dengan perubahan waktu.

Aktivitas inti dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$R = \lambda N \quad \text{atau} \quad R = -\frac{dN}{dt} \qquad \text{.... (10.4)}$$

Dari persamaan tersebut dapat dituliskan :

$$\lambda N = -\frac{dN}{dt} \quad \text{atau} \quad \frac{N}{dN} = -\lambda\, dt \qquad \text{.... (10.5)}$$

Jika persamaan diintegralkan akan diperoleh :

$$\int \frac{N}{dN} = -\lambda \int dt$$

$$\ln N = -\lambda t + C$$

Pada saat $t = 0$ maka

$\ln N_o = 0 + C$ jadi nilai $C = \ln N_o$

Sehingga

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_o$$

$$\ln N - \ln N_o = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_o} = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N}{N_o} = \ln e^{-\lambda t}$$

$$\frac{N}{N_o} = e^{-\lambda t} \quad \text{atau} \quad N = N_o\, e^{-\lambda t} \qquad \text{.... (10.6)}$$

Apabila persamaan pada kedua ruas kita kalikan akan diperoleh : $\lambda N = N_o e^{-\lambda t}$, di mana $\lambda N = R$ dan $\lambda N_o = R_o$ maka dapat kita tuliskan

$$R = R_o e^{-\lambda t} \quad \text{.... (10.7)}$$

dengan :

N = jumlah inti atom yang tinggal (masih radioaktif)

N_o = jumlah inti atom mula-mula

λ = tetapan peluruhan (yang nilainya tergantung jenis inti radioaktif)

t = waktu peluruhan

e = bilangan eksponensial

R_o = aktivitas inti mula-mula

R = aktivitas inti setelah waktu t

Kekuatan suatu sampel radioaktivitas memancarkan radiasi, atau *aktivitas radiasi*, dinyatakan dalam satuan Curie (Ci)

1 Ci = 3,70 × 10^{10} peluruhan/sekon.

Namun demikian, satuan SI untuk aktivitas radiasi yang biasa adalah Becquerel (Bq) yang didefinisikan sebagai :

1 Bq = 1 peluruhan/sekon

dengan demikian 1 Ci = 3,70 × 10^{10} Bq

3. Waktu Paruh ($T_{½}$)

Waktu paruh unsur radioaktif yaitu waktu yang diperlukan oleh unsur radioaktif untuk meluruh sehingga unsur radioaktif yang belum meluruh tinggal separuh dari jumlah unsur radioaktif mula-mula. Hubungan antara waktu paruh dengan tetapan peluruhan dapat ditentukan dari persamaan :

$$\ln \frac{N}{N_o} = \ln e^{-\lambda t} \quad \text{.... (10.8)}$$

untuk $t = T_{½}$ (waktu paruh) maka $N = ½\ No$ sehingga

$$\ln \frac{\frac{1}{2} N_o}{N_o} = \ln e^{-\lambda T_{½}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{½}$$

$$-\ln 2 = -\lambda T_{½}$$

$$T_{½} = \frac{ln\,2}{\lambda} \text{ atau } T_{½} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{.... (10.9)}$$

di mana :

$T_{½}$ = waktu paruh

λ = tetapan peluruhan

Pada umumnya laju peluruhan unsur radioaktif dapat dinyatakan dalam waktu paruh, misalnya selama waktu peluruhan *t*, maka unsur yang masih radioaktif tinggal *N* maka:

Untuk $t = T_{½}$ banyaknya inti yang masih radioaktif

$N = ½\, N_o$

Untuk $t = 2T_{½}$ banyaknya inti yang masih radioaktif

$N = ½(½)\, N_o) = (½)^2\, N_o$

Untuk $t = 3T_{½}$ banyaknya inti yang masih radioaktif

$N = ½\, (½)^2 N_o = (½)^3\, N_o$

Untuk $t = 4T_{½}$ banyaknya inti yang masih radioaktif

$N = ½\, (½)^3\, N_o = (½)^4\, N_o$

Untuk $t = nT_{½}$ banyaknya inti yang masih radioaktif

$N = (½)^n\, N_o$

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa hubungan antara inti atom yang tinggal dibandingkan dengan jumlah inti atom radioaktif mula-mula dapat dituliskan :

$$N = (\frac{1}{2})^n\, N_o \quad \text{.... (10.10)}$$

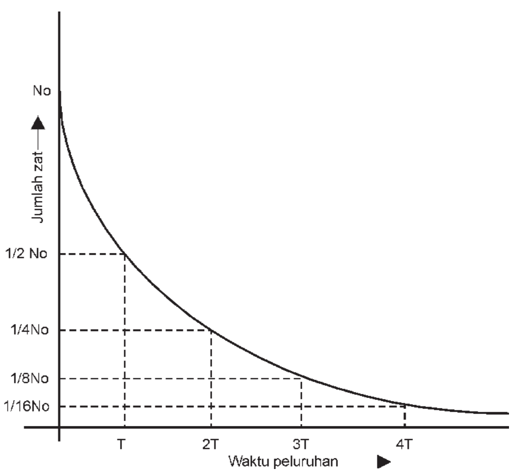
dengan :

N = jumlah inti yang tinggal

N_o = jumlah inti mula-mula

$n = \frac{t}{T_{½}}$ = waktu peluruhan dibagi waktu paruh

Hubungan antara banyaknya inti yang masih radioaktif dengan waktu peluruhan dapat dinyatakan pada **Gambar 10.3**. Pada gambar terlihat bahwa kurva yang dihasilkan sebagai fungsi eksponensial.



Gambar 10.3 *Peluruhan radioaktif*

Contoh Soal

Hitunglah aktivitas inti 100 gram inti radium ($_{82}Ra^{226}$) yang mempunyai waktu paruh 1620 tahun!

Penyelesaian :

Diketahui : $T_{½}$ = 1620 tahun

$= 1620 \times 365 \times 24 \times 3600$ s

$= 5{,}1 \times 10^{10}$ s

m = 100 gram

A_{Ra} = 226

$N = \dfrac{mN_A}{A_{Ra}}$ (A = bilangan avogadro = $6{,}025.10^{23}$ Partikel/mol)

$$= \frac{10^2 \times 6{,}025 \times 10^{23}}{226}$$

$= 2{,}67 \times 10^{22}$ partikel (atom)

Ditanyakan : R = ...?

Jawab : $R = \lambda N$

$$= \frac{0{,}693}{T_{½}}.N$$

$$= \frac{0{,}693}{5{,}1.10^{10}} \times 2{,}67 \times 10^{22}$$

$$= \frac{1{,}85}{5{,}1} \times 2{,}67 \times 10^{12}$$

$= 2{,}76 \times 10^{11}$ partikel/sekon

$$R = \frac{2{,}76 \times 10^{11}}{3{,}7 \times 10^{10}}$$

$= 7{,}46$ Ci

Soal Latihan :

1. Hitunglah aktivitas inti atom 10 gram ${}_{92}U^{235}$ yang mempunyai waktu paruh $T = 7{,}07.10^{8}$ s!
2. Suatu atom radioaktif mula mula mempunyai aktivitas inti 20 Ci. Apabila waktu paruh atom itu 2 jam, hitunglah aktivitas intinya setelah 4 jam kemudian!

4. Deret Radioaktif

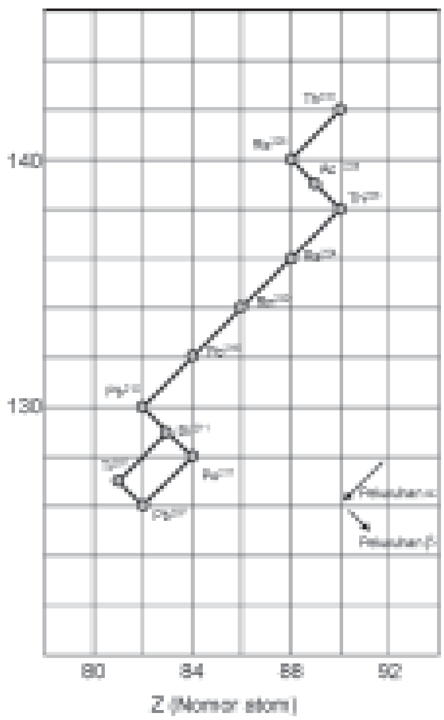
Suatu unsur radioaktif (isotop radioaktif) selalu meluruh sehingga terbentuk unsur yang baru. Unsur yang terbentuk masih juga besifat radioaktif sehingga akan meluruh, demikian terus akan terjadi sehingga akhirnya akan diperoleh hasil akhir terbentuk inti atom yang stabil/mantap. Dari hasil inti-inti yang terbentuk yang bersifat radioaktif sampai diperoleh inti atom yang stabil/mantap, ternyata serangkaian inti-inti atom yang terjadi memiliki nomor massa yang membentuk suatu deret.

Misalnya isotop radioaktif ${}_{92}U^{235}$ meluruh menjadi ${}_{90}Th^{231}$dengan memancarkan sinar α, selanjutnya ${}^{90}Th^{231}$ meluruh menjadi ${}_{91}Pa^{231}$ dengan memancarkan sinar β. Pemancaran sinar α dan sinar β ini akan berlangsung terus hingga terbentuk inti atom yang stabil yaitu ${}_{82}Pb^{207}$. Dari serangkaian hasil-hasil inti selama peluruhan(${}_{92}U^{235}$) sampai terbentuk inti atom yang stabil (${}_{82}Pb^{207}$) ternyata nomor massa inti yang terbentuk selalu merupakan kelipatan bilangan (4n + 3) di mana n adalah bilangan bulat. Di mana peluruhan yang diawali oleh inti induk ${}_{92}U^{235}$ sehingga diperoleh inti atom akhir ${}_{82}Pb^{207}$ yang stabil disebut *deret radioaktif (4n + 3)* yang diberi nama *deret Aktinium*.

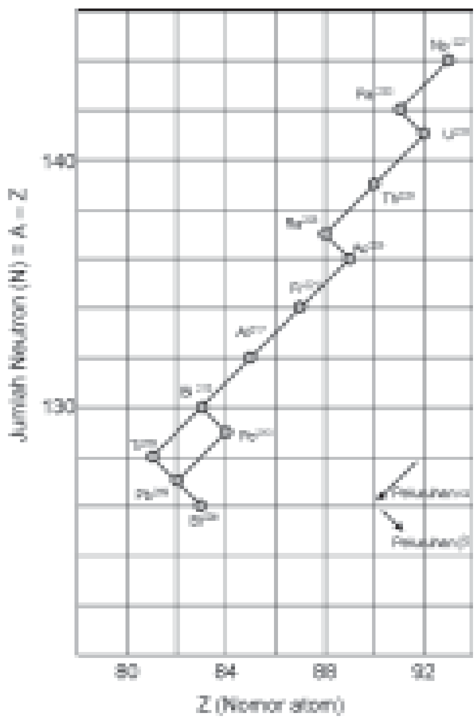
Karena dalam peluruhan radioaktif hanya pemancaran sinar α yang menyebabkan terjadinya perubahan nomor massa inti, maka unsur radioaktif dalam peluruhannya dapat digolongkan dalam 4 macam deret yaitu *deret Thorium* (4n), *deret Neptonium* (4n + 1), *deret Uranium* (4n + 2) dan *deret Aktinium* (4n + 3). Di mana dari keempat deret tersebut tiga merupakan *deret radioaktif alami* dan satu deret merupakan *deret radioaktif buatan*, yaitu deret Neptonium.

Urutan lengkap dari deret-deret radioaktif tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

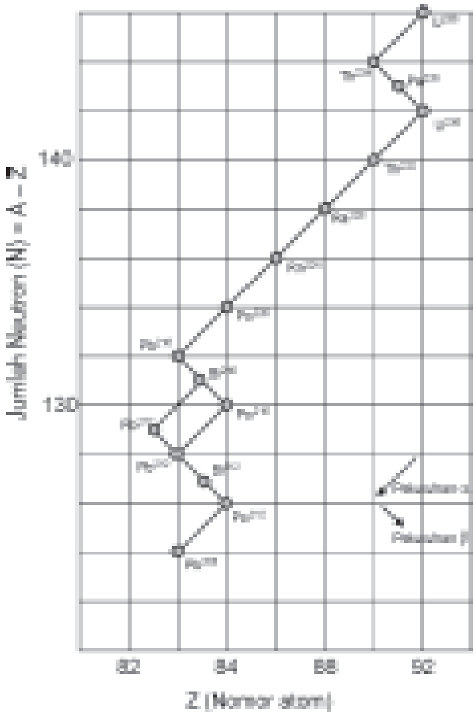
Nomor Massa	Nama Deret	Inti Induk	Waktu Paruh dalam Tahun	Produk Inti Akhir Stabil
4n	Thorium	$_{93}Th^{232}$	$1{,}39 \times 10^9$	$_{82}Pb^{208}$
4n + 1	Neptonium	$_{93}Np^{232}$	$2{,}25 \times 10^6$	$_{83}Bi^{209}$
4n + 2	Uranium	$_{93}U^{232}$	$4{,}51 \times 10^9$	$_{82}Pb^{206}$
4n + 3	Aktinium	$_{93}U^{232}$	$7{,}07 \times 10^8$	$_{82}Pb^{207}$

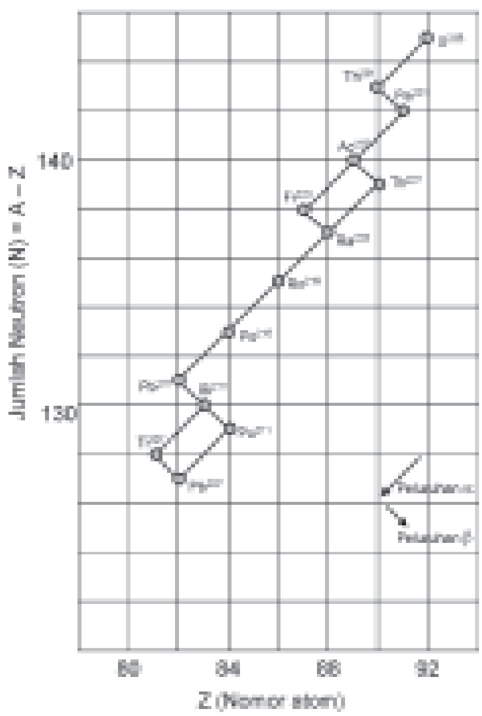


Gambar 10.3a Deret Thorium



Gambar 10.3b Deret Neptunium





Sumber: Konsep Fisika Modern Arthur Beiser

Gambar 10.3c *Deret Uranium*

Gambar 10.3d *Deret Aktinium*

C. Reaksi Inti

Reaksi inti merupakan peristiwa perubahan suatu inti atom sehingga berubah menjadi inti atom lain dengan disertai munculnya energi yang sangat besar. Agar terjadi reaksi inti diperlukan partikel lain untuk menggoyahkan kesetimbangan inti atom sehingga kesetimbangan inti terganggu. Akibatnya inti akan terpecah menjadi dua inti yang baru. Partikel yang digunakan untuk mengganggu kesetimbangan inti yaitu partikel *proton* atau *neutron*. Di mana partikel proton atau neutron yang berenergi ditembakkan pada inti target sehingga setelah reaksi terjadi akan terbentuk inti atom yang baru disertai terbentuknya partikel yang baru. Inti target dapat merupakan inti atom yang stabil, sehingga setelah terjadi reaksi menyebabkan inti atom menjadi inti yang tidak stabil yang kemudian disebut *isotop radioaktif*. Jadi reaksi inti dapat juga bertujuan untuk mendapatkan isotop radioaktif yang berasal dari inti stabil.

Contoh reaksi inti antara lain adalah ${}_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$ yaitu inti atom Nitrogen ditembak dengan partikel (${}_2He^4$) menjadi inti atom Oksigen dengan disertai timbulnya proton (${}_1H^1$), inti atom oksigen yang terbentuk bersifat radioaktif.

Dalam reaksi inti juga berlaku hukum-hukum Fisika seperti yang terjadi pada peristiwa-peristiwa Fisika yang lainnya antara lain berlaku : kekekalan momentum, hukum kekekalan energi, hukum kekekalan nomor atom, dan hukum kekekalan nomor massa. Sehingga momentum, energi, nomor atom, dan nomor massa inti sebelum reaksi dan sesudah reaksi harus sama.

Energi reaksi inti yang timbul diperoleh dari penyusutan massa inti, yaitu perbedaan jumlah massa inti atom sebelum reaksi dengan jumlah massa inti atom sesudah reaksi. Menurut Albert Einstein dalam kesetaraan antara massa dan energi dinyatakan bahwa energi total yang dimiliki oleh suatu massa sebesar m adalah $E = mc^2$. Apabila semua massa inti atom dinyatakan dalam sma (satuan massa atom), maka energi total yang dimiliki massa sebesar 1 sma setara dengan energi sebesar 931 MeV (1 sma = 1,66 × 10^{-27} kg, c = 3 × 10^8 m/s dan 1 eV = 1.6 × 10^{-19} Joule)

Misalnya suatu reaksi inti dinyatakan menurut persamaan :

$$A + a \rightarrow B + b + Q$$

Besarnya energi yang timbul dapat dicari dengan persamaan :

$$Q = \{(m_A + m_a) - (m_B + m_b)\} \times 931\ MeV \quad \text{.... (10.11)}$$

dengan :

$(m_A + m_a)$ = jumlah massa inti atom sebelum reaksi

$(m_B + m_b)$ = jumlah massa inti atom sesudah reaksi

Q = energi yang timbul selama reaksi terjadi

Dalam reaksi inti jika diperoleh $Q > 0$, maka reaksinya dinamakan reaksi *eksoterm* yaitu selama reaksi berlangsung dilepaskan energi sedangkan jika $Q < 0$, maka reaksinya dinamakan *reaksi indoterm* yaitu selama reaksi berlangsung diperlukan energi.

Reaksi inti dibedakan menjadi dua, yaitu *reaksi fisi* dan *reaksi fusi*.

1. Reaksi Fisi

Reaksi fisi yaitu reaksi pembelahan inti atom berat menjadi dua inti atom lain yang lebih ringan dengan disertai timbulnya energi yang sangat besar. Misalnya inti atom uranium-235 ditembak dengan neutron sehingga terbelah menjadi inti atom

Xe-235 dan Sr-94 disertai dengan timbulnya 2 neutron yang memiliki energi tinggi. Reaksinya dapat dituliskan :

$$_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{54}Xe^{235} + {}_{38}Sr^{94} + 2{}_{0}n^{1} + Q$$

Dalam reaksi fisi yang terjadi akan dihasilkan energi kira-kira sebesar 234 Mev. Dalam reaksi fisi ini timbul neutron-neutron baru yang berenergi tinggi. Neutron-neutron yang timbul akan menumbuk inti atom berat yang lain sehingga akan menimbulkan reaksi fisi yang lain. Hal ini akan berlangsung terus sehingga semakin lama semakin banyak reaksi inti yang dihasilkan dan dalam sekejab dapat timbul energi yang sangat besar. Peristiwa semacam ini disebut *reaksi fisi berantai*. Reaksi fisi berantai yang tak terkendali akan menyebabkan timbulnya energi yang sangat besar dalam waktu relatif singkat, sehingga dapat membahayakan kehidupan manusia. Reaksi berantai yang tak terkendali terjadi pada Bom Atom. Energi yang timbul dari reaksi fisi yang terkendali dapat dimanfaatkannya untuk kehidupan manusia. Reaksi fisi terkendali yaitu reaksi fisi yang terjadi dalam reaktor nuklir (Reaktor Atom). Di mana dalam reaktor nuklir neutron yang terbentuk ditangkap dan tingkat energinya diturunkan sehingga reaksi fisi dapat dikendalikan.

Pada umumnya untuk menangkap neutron yang terjadi, digunakan logam yang mampu menangkap neutron yaitu logam *Cadmium* atau *Boron*. Pengaturan populasi neutron yang mengadakan reaksi fisi dikendalikan oleh batang pengendali yang terbuat dari batang logam Cadmium, yang diatur dengan jalan memasukkan batang pengendali ke dalam teras-teras bahan bakar dalam reaktor. Dalam reaktor atom, energi yang timbul kebanyakan adalah energi panas, di mana energi panas yang timbul dalam reaktor ditransfer keluar reaktor kemudian digunakan untuk menggerakkan generator, sehingga diperoleh energi listrik.

2. Reaksi Fusi

Reaksi fusi yaitu reaksi penggabungan dua inti atom ringan menjadi inti atom lain yang lebih berat dengan melepaskan energi. Misalnya penggabungan deutron dengan deutron menghasilkan triton dan proton dilepaskan energi sebesar kira-kira 4,03 MeV. Penggabungan deutron dengan deutron menghasilkan inti He-3 dan neutron dengan melepaskan energi sebesar 3,3 MeV. Penggabungan triton dengan triton menghasilkan inti He-4 dengan melepaskan energi sebesar 17,6 MeV, yang reaksi fusinya dapat dituliskan :

$$_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_1H^3 + {}_1H^1 + 4 \text{ MeV}$$
$$_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 + 3{,}3 \text{ MeV}$$
$$_1H^3 + {}_1H^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_0n^1 + 17{,}6 \text{ MeV}$$

Agar dapat terjadi reaksi fusi diperlukan temperatur yang sangat tinggi sekitar 10^8 K, sehingga reaksi fusi disebut juga *reaksi termonuklir*. Karena untuk bisa terjadi reaksi fusi diperlukan suhu yang sangat tinggi, maka di matahari merupakan tempat berlangsungnya reaksi fusi. Energi matahari yang sampai ke Bumi diduga merupakan hasil reaksi fusi yang terjadi dalam matahari. Hal ini berdasarkan hasil pengamatan bahwa matahari banyak mengandung hidrogen ($_1H^1$). Dengan reaksi fusi berantai akan dihasilkan inti helium-4. Di mana reaksi dimulai dengan penggabungan antardua atom hidrogen membentuk deutron, selanjutnya antara deutron dengan deutron membentuk inti atom helium-3 dan akhirnya dua inti atom helium-3 bergabung membentuk inti atom helium-4 dan 2 atom hidrogen dengan melepaskan energi total sekitar 26,7 MeV, yang reaksinya dapat dituliskan:

$$_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1H^2 + {}_1e^0 + Q_1$$
$$_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2H^3 + \gamma + Q_2$$
$$_2H^3 + {}_2H^3 \rightarrow {}_2He^4 + 2\,{}_1H^1 + Q_3$$

Reaksi tersebut dapat ditulis:

$$4\,{}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + 2\,{}_1e^0 + Q$$

D. Reaktor Atom

Reaktor atom/nuklir adalah tempat terjadinya reaksi berantai yang menyangkut reaksi fisi yang terkendali. Sebuah reaktor merupakan sumber energi yang efisien. Reaksi fisi 1 gram nuklida per hari akan menimbulkan energi sebesar 1 MW (10^6 W), ini sebanding dengan pembakaran batu bara sebanyak 2,6 ton perhari agar menghasilkan energi sebesar itu. Energi yang dilepaskan dalam suatu reaktor nuklir timbul sebagai energi kalor dan dapat diambil dengan mengalirkan zat cair atau gas untuk pendingin, melalui bagian dalam reaktor. Selanjutnya energi tersebut ditransfer keluar reaktor dengan pendingin sekunder yang akan mengubah energi kalor

menjadi energi uap yang dapat digunakan untuk menggerakkan turbin yang akan menggerakkan dinamo/generator, sehingga akan diperoleh energi listrik. **Enrico Fermi** adalah orang pertama yang berhasil mendirikan reaktor nuklir di universitas Chicago yang berhasil dijalankan dalam bulan Desember 1942. Sebagai bahan bakar reaktor tersebut adalah uranium-235.

Menurut kegunaannya, reaktor nuklir dapat dibedakan menjadi tiga.

1. Reaktor Produksi Isotop

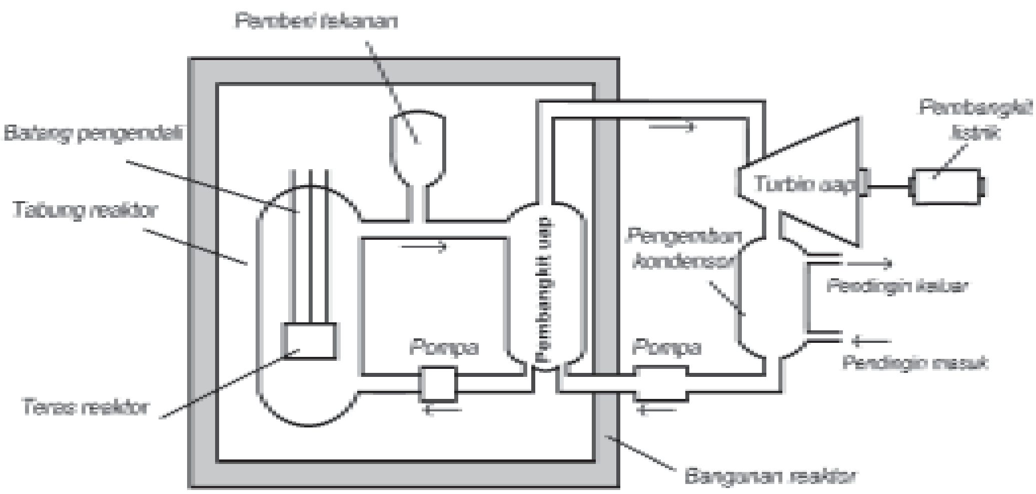
Reaktor produksi isotop yaitu reaktor yang menghasilkan radioisotop yang banyak dipakai dalam bidang nuklir, kedokteran, biologi, industri, dan farmasi.

2. Reaktor Daya/Power

Reaktor daya yaitu reaktor yang dapat menghasilkan energi listrik. Reaktor daya merupakan reaktor komersial yang menghasilkan energi listrik untuk dijual misalnya PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir)

3. Reaktor Penelitian

Reaktor penelitian yaitu reaktor yang dipergunakan untuk penelitian di bidang pertanian, peternakan, industri, kedokteran, sains, dan sebagainya.



Gambar 10.4 *Sketsa reaktor nuklir*

Wawasan Produktivitas : Inovatif dan Kreatif

Reaksi inti atom dapat berlangsung sangat cepat dan dihasilkan energi yang sangat besar. Dari energi reaksi inti atom ini manusia dapat memanfaatkan untuk kesejahteraan manusia tetapi sebagian juga memanfaatkan sebagai alat pembunuh massal, misalnya dibuatnya bom atom dan bom hidrogen sebagai senjata perang pada abad modern ini. Coba jelaskan prinsip yang membedakan antara perbedaan bom atom dengan bom hidrogen tersebut!

E. Pemanfaatan Radioisotop dalam Teknologi

Dewasa ini perkembangan teknologi nuklir terjadi sangat pesat. Isotop radioaktif atau yang lebih dikenal dengan sebutan radioisotop, telah banyak dibuat yang digunakan untuk berbagai keperluan dalam penelitian maupun dalam bidang industri, pertanian, kedokteran. Radioisotop yang terdapat di alam tidak terlalu banyak termasuk U-235, radium-226, kalium-40, rubidium-87, dan carbon-14. Pembuatan radioisotop dilakukan di dalam reaktor pembiak (reaktor atom yang khusus membuat radioisotop).

Sebagai penghasil radioisotop, reaktor atom dapat menghasilkan berbagai macam radioisotop yang dapat dimanfaatkan untuk banyak keperluan. Selain itu reaktor atom juga dapat menghasilkan neutron yang dapat digunakan untuk penelitian. Unsur radioaktif yang tersedia di alam tidak memadai untuk memenuhi kebutuhan tertentu yang menghendaki sifat-sifat tertentu dari unsur radioaktif tersebut. Misalnya mengenai waktu paruhnya dan jenis radiasinya. Oleh karena itu, dibuat unsur radioaktif buatan yang sesuai dengan kebutuhannya.

Pengunaan radioisotop di bidang penelitian ilmiah misalnya di bidang ilmu pengetahuan Biologi para ahli telah menggunakan besi-59 untuk mempelajari umur sel-sel darah merah manusia. Sel darah merah yang ditandai dengan besi-59 diketahui mempunyai rentang hidup rata-rata 120 hari.

Dalam ilmu kelautan, radioisotop telah digunakan untuk menganalisis arus laut dan arus pantai. Suatu perunut radioisotop Iodin-131 disemprotkan ke dalam air laut di tengah-tengah suatu susunan melingkar detektor-detektor yang peka. Berbagai detektor itu menangkap jumlah radioisotop yang sampai padanya. Dengan demikian

dimungkinkan dapat ditentukannya arah maupun kecepatan arus laut dengan tepat dan cepat.

Di bidang kedokteran, radioisotop digunakan untuk keperluan diagnosis dan perawatan medis. Mesin sinar X merupakan peralatan diagnosis penting yang selama bertahun-tahun telah digunakan. Alat ini membutuhkan arus listrik untuk pengoperasiannya. Kini dengan menggunakan sinar gamma dari sinar radioisotop, dapat diperoleh hasil yang sama. Karena peralatan yang menggunakan sinar gamma sangat ringan dan tidak memerlukan arus listrik yang besar, maka alat ini dapat digunakan di lapangan atau di tempat-tempat yang sekiranya pasien sulit dipindahkan ke ruang sinar X. Isotop tulium-170, iridium-192, kobalt-60, sesium-137, dan iodin-131 telah menyediakan radiasi untuk keperluan ini.

Perunut radioaktif dipergunakan untuk menentukan letak tumor dan merunut gerakan darah di seluruh tubuh. Unsur-unsur tertentu cenderung terpusat dalam bagian-bagian tubuh yang khas. Misalnya kalsium dan strontium adalah perunut tulang, iodin memusat pada kelenjar gondok, arsen dan tembaga pada otak. Di samping untuk diagnosis, radioisotop juga digunakan sebagai alat penyembuh, misalnya sinar gamma yang berasal dari kobalt-60 digunakan untuk membunuh sel-sel kanker, atau sinar gamma juga dapat untuk menyeterilkan peralatan kedokteran, misalnya alat-alat bedah, alat suntik dan lain-lainnya dengan jalan penyinaran.

Di bidang industri, radioisotop dapat digunakan untuk mengukur ketebalan bahan, mengontrol kualitas bahan dengan memanfaatkan sinar gamma yang dipancarkan. Dalam industri pengolahan bahan makanan. Radiasi radioisotop dapat digunakan untuk membasmi mikroorganisme yang berbahaya, sebagai anti hama pada padi-padian, dan untuk menghalangi pembentukan kecambah pada beberapa sayur-sayuran.

Radiasi dari radioisotop sering juga digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa di bawah tanah dengan jalan memasukkan radioisotop dalam fluida yang mengalir dalam pipa tersebut. Pada tempat yang bocor akan mempunyai aktivitas yang tinggi dibandingkan tempat yang lain.

Penggunaan radioisotop, di samping mendatangkan banyak manfaat, juga dapat mendatangkan masalah. Masalah yang dihadapi sekarang ini di antaranya, masalah pengontrolan dan pembuangan limbah nuklir. Pembuatan persenjataan nuklir dari negara-negara maju maupun negara yang berkembang yang tidak dikontrol akan membahayakan bagi kehidupan. Misalnya dengan terjadinya perang antarnegara yang menggunakan persenjataan nuklir. Di samping itu

pembuangan sampah nuklir yang berasal dari reaktor atom akan menjadi masalah jika dibuang sembarangan, karena limbah tersebut masih bersifat radioaktif. Radiasi yang dipancarkan akan membahayakan lingkungan sekitarnya.

Seseorang yang mendapat sinar radiasi dalam waktu yang lama akan menyebabkan timbulnya penyakit di dalam tubuh, di antaranya kanker, leukimia, dan gangguan saraf. Hal ini dikarenakan radiasi sinar radioaktif dapat menyebabkan perubahan pada sel-sel tubuh.

Soal Latihan :

1. Hitunglah energi yang ditimbulkan reaksi inti :

   $${}^{236}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{146}_{57}La + {}^{67}_{35}Br + 3\,{}^{1}_{0}n$$

   Bila diketahui energi ikat per nukleon ${}^{236}_{92}U$= 7,59 MeV, ${}^{146}_{57}La$= 8,41 MeV, ${}^{67}_{35}Br$ = 8,59 MeV

2. Hitunglah energi yang timbul pada reaksi inti :

   $${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n$$

   Bila diketahui massa ${}^{235}_{92}U$= 235,0457 sma, massa ${}^{141}_{56}Ba$= 140,9177 sma, massa ${}^{92}_{36}Kr$= 91,8854 sma, dan massa ${}^{1}_{0}n$ = 1,0087 sma, 1sma = 931,5 MeV

3. Berapa MeV energi yang ditimbulkan dalam reaksi inti :

   $${}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}H + {}^{1}_{0}n.$$

   Bila diketahui massa ${}^{3}_{1}H$ = 3,01605 sma, massa ${}^{2}_{1}H$= 2,0141 sma, massa ${}^{4}_{2}H$= 4,0026 sma, massa ${}^{1}_{0}n$= 1,0086 sma, dan 1 sma = 931,5 MeV

4. Sebuah reaktor atom menggunakan bahan bakar U–235. Apabila reaktor tersebut mempunyai daya 50 MW dan energi yang dilepas tiap fisinya rata-rata 200 MeV, tentukan waktu yang diperlukan untuk menghabiskan 1 kg bahan bakar U–235!

5. Berapa daya output dari sebuah reaktor jika dalam waktu 30 hari dihabiskan 2 kg bahan uranium dan tiap reaksi fisi menghasilkan energi 200 MeV?

Life Skills : Kecakapan Vokasional

Pada zaman modern seperti sekarang ini kebutuhan akan energi listrik sangat besar, karena sebagian besar untuk melaksanakan pekerjaan di kantor-kantor dan industri sudah banyak memakai alat-alat elektrik dan komputer yang semuanya itu membutuhkan energi listrik. Di negara yang telah maju seperti halnya Amerika Serikat sebagian besar energi listriknya dipasok dari pembangkit listrik tenaga nuklir dari reaktor atom/nuklir. Pembangkit listrik tenaga nuklir mempunyai banyak keuntungan dibandingkan dengan menggunakan bahan bakar yang lainnya. Saat ini Indonesia, melalui media TV, sering disosialisasikan untuk membangun pusat pembangkit listrik tenaga nuklir. Rencananya dibangun di Jawa Tengah di sekitar Jepara, untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik di Jawa dan Bali. Berdirinya reaktor nuklir tidak akan membahayakan bagi penduduk yang tinggal di sekitar reaktor, karena saat ini banyak putra-putri terbaik bangsa Indonesia telah menguasai teknologi ini. Carilah sumber-sumber bacaan baik dari buku referensi atau internet yang menyangkut tentang reaktor nuklir yang digunakan untuk pembangkit tenaga listrik. Buatlah suatu ringkasan dari hasil bacaan yang telah kamu lakukan, misalnya mengenai pembuatan reaktor, prinsip kerja reaktor, jenis-jenis reaktor, energi yang dihasilkan serta dampak positif dan negatifnya dari reaktor nuklir. Kemudian kumpulkan pada guru fisika kalian, sebagai tugas kelompok atau perorangan!

Seputar Tokoh



Marie Sklodowska Curie (1867 – 1934) lahir di Polandia, ketika Rusia berkuasa. Pada tahun 1891 ia mulai mempelajari fisika, kimia, dan matematika di Paris. Bersama suaminya Piere mempelajari tentang zat radioaktif yang kemudian menemukan unsur radioaktif yang diberi nama polonium dan radium. Marie Sklodowska Curie menerima hadiah Nobel sebanyak dua kali, yaitu tahun 1903 dan 1911. Karena selama hidupnya banyak digunakan untuk meneliti zat radioaktif, sehingga ia terkena radiasi dalam jangka waktu yang cukup panjang. Akhirnya kesehatannya menurun dan ia meninggal karena penyakit leukemia.

Ringkasan

1. Proton dan neutron adalah partikel penyusun inti, dalam inti atom proton dan neutron dapat bersatu karena adanya gaya ikat inti.

2. Energi ikat inti diperoleh dari defek massa, yaitu terjadinya penyusutan massa inti atom jika dibandingkan dengan jumlah massa seluruh partikel penyusun inti atom, yaitu proton dan neutron. Besarnya defek massa dinyatakan :

   $$\Delta m = \left(Zm_p + (A - Z)m_n\right) - m_{inti}$$

3. Ada tiga jenis sinar radiasi radioaktif, yaitu sinar alpha, beta, dan gamma. Daya tembus sinar gamma paling kuat dan sinar alpha paling lemah, sedangkan untuk daya ionisasi sinar alpha paling besar, sedangkan sinar gamma paling kecil.

4. Jika suatu atom radioaktif memancarkan sinar alpha maka akan menyebabkan nomor atom berkurang dua dan nomor massanya berkurang empat, sedangkan bila memancarkan sinar beta nomor atom bertambah satu sedangkan nomor massanya tetap. Pemancaran sinar gamma merupakan pemancaran gelombang elektromagnetik yang berenergi tinggi/ frekuensi tinggi.

5. Aktivitas inti radioaktif yaitu keaktifan zat radioaktif untuk memancarkan sinar radioaktif yang besarnya tergantung pada jumlah zat radioaktif mula-mula, yang dinyatakan :

   $$R = \lambda N \quad \text{atau} \quad R = -\frac{dN}{dt}$$

6. Waktu paruh unsur radioaktif yaitu waktu yang diperlukan oleh unsur radioaktif untuk meluruh sehingga unsur radioaktif yang belum meluruh tinggal separuhnya. Waktu paruh dinyatakan dalam : $T_{½} = \frac{ln\ 2}{\lambda}$

7. Hubungan antara jumlah zat radioaktif yang masih aktif dengan jumlah zat radioaktif mula-mula setelah meluruh dalam waktu t dinyatakan : $N = (1/2)^n N_o$

8. Unsur radioaktif dapat dikelompokkan ke dalam empat deret radioaktif yaitu :

Nomor massa	Nama deret	Inti induk	Waktu paruh dalam dalam	Produk inti akhir stabil
4n	Thorium	$_{93}Th^{232}$	$1,39 \times 10^9$	$_{82}Pb^{208}$
4n + 1	Neptonium	$_{93}Np^{232}$	$2,25 \times 10^6$	$_{83}Bi^{209}$
4n + 2	Uranium	$_{93}U^{232}$	$4,51 \times 10^9$	$_{82}Pb^{206}$
4n + 3	Aktinium	$_{93}U^{232}$	$7,07 \times 10^8$	$_{82}Pb^{207}$

9. Reaksi pada inti atom dibedakan menjadi dua, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi. Reaksi fisi yaitu reaksi pembelahan inti atom menjadi inti-inti yang lebih ringan, sedangkan reaksi fusi yaitu reaksi penggabungan dua inti atom membentuk inti atom. Sebagai contoh :

   Reaksi fisi :

   ${}_{92}U^{235} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{54}Xe^{235} + {}_{38}Sr^{94} + 2{}_{0}n^{1} + Q$

   Reaksi fusi :

   ${}_{1}H^{2} + {}_{1}H^{2} \rightarrow {}_{1}H^{3} + {}_{1}H^{1} + 4\ \text{MeV}$

10. Reaktor atom/reaktor nuklir yaitu tempat untuk berlangsungnya reaksi inti. Reaktor atom berdasarkan tujuannya dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu reaktor penelitian, reaktor daya, dan reaktor produksi isotop.

11. Radioisotop banyak dimanfaatkan dalam segala bidang antara lain penelitian ilmiah, bidang kedokteran, farmasi, industri, pertanian, dan sebagainya. Misalnya isotop Co-60 digunakan untuk penyinaran penderita kanker yaitu untuk membunuh sel-sel kanker tersebut, selain itu dapat digunakan untuk menyeterilkan alat-alat bedah maupun alat-alat medis dengan penyinaran sinar gamma yang dihasilkan radioisotop tersebut.

Uji Kompetensi

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Partikel penyusun inti atom adalah ....
   A. proton dan elektron
   B. elektron dan neutron
   C. proton dan neutron
   D. proton, elektron, dan neutron
   E. ion positif dan ion negatif

2. Nomor massa dari suatu atom menyatakan ....
   A. jumlah elektron dan positron dalam atom
   B. jumlah proton dan neutron dalam inti atom
   C. jumlah proton dan elektron dalam inti atom
   D. jumlah proton dalam inti atom
   E. jumlah elektron atom

3. Sebuah unsur $_{82}Pb^{208}$ memiliki ....
   A. 82 elektron, 82 proton, dan 126 neutron
   B. 82 elektron, 126 proton, dan 82 neutron
   C. 126 elektron, 82 proton, dan 82 neutron
   D. 82 elektron, 82 proton, dan 208 neutron
   E. 208 elektron, 208 proton, dan 82 neutron

4. Dua buah atom yang memiliki nomor atom sama tetapi nomor massanya berbeda disebut ....
   A. isomer
   B. isotop
   C. isobar
   D. isokorik
   E. isoterm

5. Berdasarkan urutan daya tembusnya, sinar radioaktif dapat diurutkan menurut ....
   A. sinar alpha, sinar beta, sinar gamma
   B. sinar beta, sinar gamma, sinar alpha
   C. sinar gamma, sinar alpha, sinar beta
   D. sinar gamma, sinar beta, sinar alpha
   E. sinar beta, sinar alpha, sinar gamma

6. Urutan sinar radioaktif berdasarkan daya ionisasinya adalah sinar ....
   A. alpha, beta, gamma
   B. beta, gamma, alpha
   C. gamma, alpha, beta
   D. beta, alpha, gamma
   E. gamma, beta, alpha

7. Bila diketahui massa inti $_{4}Be^{9}$ 9,0121 sma, massa proton = 1,0076 sma dan massa neutron = 1, 0086. Di mana 1 sma = 931,5 MeV, maka besarnya energi ikat inti atom Be adalah ....
   A. 51,39 MeV
   B. 57,82 MeV
   C. 62,10 MeV
   D. 90,12 MeV
   E. 90,74 MeV

8. Suatu zat radioaktif memiliki waktu paruh 10 menit. Jika mula-mula ada 40 gram, maka setelah waktu 30 menit zat radioaktif yang masih tertinggal sebanyak …gram.
   A. 2,5
   B. 5
   C. 10
   D. 15
   E. 20

9. Atom $_{87}Fr^{221}$ berubah menjadi inti atom $_{83}Bi^{209}$ dengan memancarkan beberapa partikel dan energi, partikel yang dipancarkan itu adalah ....
   A. 2α dan 2γ
   B. 4α dan 4γ
   C. 3α dan β
   D. 3α dan 2β
   E. 2α dan 2β

10. Dalam waktu 48 hari , $\frac{63}{64}$ bagian suatu unsur radioaktif meluruh. Waktu paruh unsur radioaktif tersebut adalah … (dalam hari)
   A. 8
   B. 16
   C. 24
   D. 32
   E. 36

B. Kerjakan soal berikut ini dengan benar!

1. Deskripsikan secara singkat tentang :
   a. Defek massa
   b. Radioisotop
   c. Reaktor atom
   d. Waktu paruh
   e. Aktivitas inti
2. Hitunglah energi ikat inti bila diketahui massa inti Li = 7,0178 sma dan massa proton =1,0078 sma, dan massa neutron = 1,0086 sma!
3. Sebutkan tiga jenis sinar radiasi dari radioaktif dan jelaskan sifat-sifat sinar tersebut mengenai daya tembus dan daya ionisasinya terhadap bahan!
4. Sebutkan macam reaktor atom berdasarkan kegunaanya! Reaktor atom Kartini (BATAN) yang ada di Yogyakarta termasuk yang mana?
5. Suatu reaktor nuklir mempunyai daya output 250 MW. Energi ini berasal dari reaksi fisi dalam suatu reaktor nuklir. Tiap reaksi fisi dihasilkan energi 200 MeV. Hitung berapa banyak bahan bakar (U-235) yang terpakai selama 1 tahun! (Anggap tidak ada energi yang hilang seluruh energi fisi dimanfaatkan seluruhnya).

Refleksi

Setelah mempelajari materi bab ini, diharapkan kalian mampu memahami tentang :

1. identifikasi karakteristik inti atom dan radioaktif, dan
2. deskripsi pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Apabila masih ada yang belum kalian pahami, pelajari kembali atau tanyakan pada guru kalian!

Uji Kompetensi Akhir Semester 2

Kerjakan di buku tugas kalian!

A. Pilihlah salah satu jawaban yang paling tepat dengan memberi tanda silang (X) pada huruf A, B, C, D, atau E!

1. Besarnya perbandingan energi radiasi yang dipancarkan sebuah benda pada suhu 27 ^oC dan 327 ^oC adalah ....
   A. 1 : 2
   B. 1 : 4
   C. 1 : 8
   D. 1 : 16
   E. 1 : 32

2. Jika panjang gelombang yang membawa energi maksimum 5000 Å dan konstanta pergeseran Wien = $2,9.10^{-3}$ mK, maka suhu permukaan matahari diperkirakan ....
   A. 2900 K
   B. 5800 K
   C. 6000 K
   D. 6700 K
   E. 7000 K

3. Menurut Stefan-Boltzmann besarnya energi radiasi kalor yang dipancarkan oleh suatu benda ....
   A. berbanding terbalik dengan luas penampang benda
   B. berbanding terbalik dengan suhu mutlaknya
   C. berbanding lurus dengan pangkat empat suhu mutlaknya
   D. berbanding lurus dengan kuadrat suhu mutlaknya
   E. berbanding terbalik dengan kuadrat suhu mutlaknya

4. Jika seberkas sinar ungu yang frekuensinya 10^{16} Hz dijatuhkan pada permukaan logam yang memiliki energi ambang sebesar $4,2 \times 10^{-18}$ J. Apabila konstanta Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Js maka energi kinetik elektron foto yang terlepas dari permukaan logam adalah ....
   A. $2,2 \times 10^{-18}$ J
   B. $2,4 \times 10^{-18}$ J
   C. $3,2 \times 10^{-18}$ J
   D. $3,4 \times 10^{-18}$ J
   E. $6,6 \times 10^{-18}$ J

5. Apabila elektron berpindah dari kulit M ke kulit L maka spektrum radiasi yang dipancarkan termasuk dalam deret ....
   A. Lyman
   B. Balmer
   C. Bracket
   D. Pfund
   E. Paschen

6. Percobaan efek fotolistrik membuktikan bahwa gelombang cahaya merupakan paket-paket energi yang disebut foton. Besarnya energi tiap foton ....
   A. berbanding terbalik dengan frekuensi gelombangnya
   B. berbanding lurus dengan panjang gelombangnya
   C. berbanding lurus dengan amplitudo gelombangnya
   D. berbanding lurus dengan frekuensi gelombangnya
   E. berbanding terbalik dengan amplitudo gelombangnya

7. Menurut teori atom Bohr dalam postulatnya menyatakan bahwa elektron berputar mengelilingi inti atom tidak pada sembarang lintasan tetapi hanya pada lintasan-lintasan tertentu. Besarnya momentum anguler lintasan itu adalah ....
   A. berbanding lurus dengan tetapan Planck
   B. berbanding lurus dengan tetapan Wien
   C. berbanding lurus dengan tetapan Ryberg
   D. berbanding terbalik dengan tetapan Planck
   E. berbanding terbalik dengan momentum liniernya

8. Pada peristiwa efek fotolistrik apabila intensitas cahaya yang dijatuhkan pada permukaan logam diperbesar maka ....
   A. energi kinetik elektron yang terlepas semakin besar
   B. makin besar kecepatan elektron yang terlepas
   C. makin besar energi ambangnya
   D. makin banyak jumlah elektron yang terlepas
   E. makin besar energi yang diserap logam

9. Besarnya frekuensi ambang logam natrium adalah $4{,}4 \times 10^{14}$ Hz. Jika permukaan logam natrium tersebut disinari dengan cahaya yang frekuensinya 6×10^{14} Hz , $h = 6{,}6 \times 10^{-34}$ Js dan $c = 3 \times 10^{8}$ m/s maka besarnya potensial penghenti foto elektron adalah ....
   A. 0,16 Volt
   B. 0,32 Volt
   C. 0,48 Volt
   D. 0,66 Volt
   E. 0,99 Volt

10. Sebuah logam mempunyai fungsi kerja 1,8 eV, jika logam tersebut disinari dengan cahaya yang mempunyai panjang gelombang 4000 Å maka potensial foto elektron yang terjadi adalah ....
   A. 0,65 Volt
   B. 0,85 Volt
   C. 1,30 Volt
   D. 1,70 Volt
   E. 2,30 Volt

11. Besarnya energi kinetik elektron yang terlepas pada permukaan logam pada efek foto listrik tidak tergantung pada ....
   A. frekuensi cahaya
   B. panjang gelombang cahaya
   C. intensitas cahaya
   D. frekuensi ambang
   E. warna cahaya

12. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan $1{,}1 \times 10^6$ m/s. Jika massa elektron 9×10^{-31}kg dan konstanta Planck $6{,}6 \times 10^{-34}$ Js maka panjang gelombang de Broglie elektron tersebut adalah ....
    A. $4{,}8 \times 10^{-10}$ m
    B. $5{,}0 \times 10^{-10}$ m
    C. $5{,}2 \times 10^{-10}$ m
    D. $6{,}6 \times 10^{-10}$ m
    E. $8{,}2 \times 10^{-10}$ m

13. Percobaan Rutherfor menghasilkan kesimpulan ....
    A. elektron tersebar merata pada kulit atom
    B. atom bagian terkecil dari unsur
    C. massa inti atom terpusat pada satu titik yang disebut inti atom
    D. elektron bergerak mengelilingi inti pada lintasan lintasan tertentu yang disebut lintasan stasioner
    E. elektron adalah bagian atom yang bermuatan negatif

14. Menurut teori Bohr kecepatan elektron mengelilingi inti ....
    A. sebanding dengan bilangan kuantum utama
    B. berbanding terbalik dengan bilangan kuantum utamanya
    C. sebanding dengan kuadrat bilangan kuantum utamanya
    D. berbanding terbalik dengan kuadrat bilangan kuantum utamanya
    E. sebanding dengan jari-jari lintasannya

15. Setelah terjadi tumbukan antara elektron dengan foton pada percobaan efek Compton maka ....
    A. frekuensi foton bertambah besar
    B. panjang gelombang foton bertambah besar
    C. energi foton bertambah besar
    D. perubahan panjang gelombang foton berbanding terbalik dengan tetapan Planck
    E. Perubahan panjang gelombang foton berbanding lurus dengan sinus sudut hamburan foton

16. Jari-jari lintasan elektron untuk atom hidrogen untuk bilangan kuantum utama n = 2 adalah ....
    A. $2,12 \times 10^{-10}$ m
    B. $2,13 \times 10^{-10}$ m
    C. $3,12 \times 10^{-10}$ m
    D. $4,13 \times 10^{-10}$ m
    E. $5,12 \times 10^{-10}$ m
17. Panjang gelombang pada deret Paschen akan mencapai maksimum bila transisi elektron dari lintasan dengan bilangan kuantum ....
    A. n = 3 ke n = 1
    B. n = 3 ke n = 2
    C. n = 4 ke n = 1
    D. n = 4 ke n = 2
    E. n = 4 ke n = 3
18. Tingkat energi elektron atom hidrogen pada bilangan kuantum utama n = 3 adalah ....
    A. –0,544 eV
    B. –0,85 eV
    C. –1,51 eV
    D. – 3,39 eV
    E. –13,6 eV
19. Spektrum garis atom memberikan informasi tentang ....
    A. jumlah proton dalam inti
    B. jumlah elektron dalam atom
    C. energi dari tingkat energi elektron
    D. beda energi antara dua tingkat
    E. jari-jari lintasan elektron

20. Sebuah foton menumbuk elektron pada atom hidrogen pada lintasan n = 2 sehingga mampu mengeluarkan sebuah elektron dengan energi kinetik sebesar 8,61 eV maka besarnya energi foton tersebut adalah ....
   A. 9,15 eV
   B. 9,46 eV
   C. 10,12 eV
   D. 12,0 eV
   E. 13,6 eV

21. Persentase perubahan panjang gelombang foton 1 Å yang terhambur dengan sudut 60^o pada percobaan efek Compton adalah ....
   A. 1,21 %
   B. 5,21 %
   C. 7,21 %
   D. 8,21 %
   E. 9,21 %

22. Sebuah partikel yang bergerak dengan kecepatan 0,6 c (c = cepat rambat cahaya) maka perbandingan massa relativitas partikel tersebut dibandingkan dengan massa diamnya adalah ....
   A. 0,25
   B. 0,50
   C. 0,75
   D. 1,00
   E. 1,25

23. Suatu unsur radioaktif mempunyai waktu paruh 15 hari. Jika unsur radioaktif mula-mula sebanyak 80 gr maka setelah 2 bulan tinggal ....
   A. 5 gr
   B. 10 gr
   C. 20 gr
   D. 40 gr
   E. 60 gr

24. Inti ringan yang memiliki jumlah proton lebih banyak dari jumlah neutronnya akan menjadi inti stabil dengan memancarkan ....
A. partikel beta
B. partikel alfa
C. positron
D. sinar gamma
E. elektron

25. Dalam reaksi nuklir berikut ....
$_4Be^9 + \alpha \rightarrow X +$ neutron
A. nomor atom X adalah 4
B. nomor atom X adalah 5
C. nomor massa X adalah 10
D. nomor massa X adalah 12
E. nomor massa X adalah 13

26. Sebuah partikel yang bergerak dengan kecepatan 0,5 c terhadap kerangka acuan laboratorium memancarkan sebuah elektron searah dengan kecepatan 0,5 c relatif terhadap partikel. Kelajuan elektron tadi menurut kerangka acuan laboratorium adalah ....
A. 0,5 c
B. 0,6 c
C. 0,7 c
D. 0,8 c
E. c

27. Misalnya ada dua orang anak kembar A dan B. Pada suatu saat A pergi berkelana ke angkasa luar dengan menggunakan pesawat antariksa dengan kelajuan $\frac{1}{2}\sqrt{3}\ c$. Setelah 10 tahun berkelana A pulang kembali ke bumi. Menurut B yang tinggal di bumi A telah berkelana selama ....
A. 5 tahun
B. 10 tahun
C. 15 tahun
D. 20 tahun
E. 25 tahun

28. Waktu hidup partikel muon adalah 3×10^{-4} s, jika partikel muon itu bergerak dengan kecepatan 0,8 c maka waktu hidupnya menjadi ....
A. 2×10^{-4} s
B. 3×10^{-4} s
C. 4×10^{-4} s
D. 5×10^{-4} s
E. 6×10^{-4} s

29. Kecepatan partikel yang bergerak agar memiliki massa 1,5 kali massa diamnya adalah ....
A. $\frac{1}{2}\sqrt{2}\,c$
B. $\frac{1}{2}\sqrt{3}\,c$
C. $\frac{1}{3}\sqrt{2}\,c$
D. $\frac{1}{3}\sqrt{3}\,c$
E. $\frac{2}{3}\sqrt{3}\,c$

30. Suatu batang bergerak dengan kecepatan $\frac{5}{13}\,c$ searah memanjang batang tersebut. Jika panjang batang dalam keadaan diam adalah 52 cm, maka penyusutan batang yang diamati oleh pengamat yang diam adalah ....
A. 2 cm
B. 3 cm
C. 4 cm
D. 5 cm
E. 6 cm

31. Dua orang anak kembar A dan B pada saat umur 20 tahun. A berangkat ke planet X yang jaraknya 4 tahun cahaya dengan kecepatan 0,8 c. Setelah sampai di planet A langsung kembali lagi, maka sesampai kembali di bumi umur masing-masing adalah ....
A. A dan B sama-sama 26 tahun
B. A dan B sama-sama 30 tahun
C. A = 26 tahun dan B = 30 tahun
D. A = 30 tahun dan B = 26 tahun
E. A = 26 tahun dan B = 28 tahun

32. Bila diketahui massa elektron m = $9{,}1\times10^{-31}$ kg, cepat rambat cahaya c = 3×108 m/s dan tetapan Planck = $6{,}6 \times 10^{-34}$ Js, maka besarnya energi kinetik elektron yang bergerak dengan kecepatan 0,8 c adalah ....
A. 13, 65 × 10^{-14} Joule
B. 8,19 × 10^{-14} Joule
C. 6,32 × 10^{-14} Joule
D. 5,46 × 10^{-14} Joule
E. 3,24 × 10^{-14} Joule

33. Dalam spektrum emisi atom hidrogren perbandingan panjang gelombang radiasi Lyman (dari kulit L ke K) terhadap radiasi Balmer (dari kulit M ke L) adalah ....
A. $\frac{1}{3}$
B. $\frac{5}{27}$
C. $\frac{5}{24}$
D. 3
E. $\frac{27}{5}$

34. Pesawat angkasa bergerak dengan kecepatan 0,6 c searah dengan salah satu sisi lapangan sepak bola. Luas lapangan sepakbola yang diamati pilot pesawat itu terhadap luas sebenarnya berkurang sebanyak ....
A. 10 %
B. 20 %
C. 40 %
D. 60 %
E. 80 %

35. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak dengan kecepatan 0,6 c dengan 0, 8 c (c = cepat rambat cahaya) adalah ....
A. 3 : 4
B. 4 : 3
C. 9 : 2
D. 9 : 16
E. 16 : 9

36. Pernyataan berikut terkait dengan sifat suatu sinar radioaktif tertentu dibandingkan dengan sinar radioaktif lainnya.
   1. daya tembusnya paling besar
   2. dapat menimbulkan fluoresensi
   3. daya ionisasi paling lemah
   4. bermuatan listrik positif

   Sifat yang benar untuk sinar alfa (α) adalah pernyataan ....
   A. 1, 2 dan 3
   B. 1, 2, 3 dan 4
   C. 1 dan 3
   D. 2 dan 4
   E. 4 saja

37. Suatu zat radioaktif dalam waktu 15 hari zat yang meluruh sebanyak $\frac{7}{8}$ jumlah zat mula-mula. Besarnya konstanta peluruhan zat radioaktif tersebut adalah ....
   A. 0,6930 hari^{-1}
   B. 0,3465 hari^{-1}
   C. 0,2310 hari^{-1}
   D. 0,1733 hari^{-1}
   E. 0,1386 hari^{-1}

38. Aktivitas 1 gr radium ($_{88}Ra^{226}$) adalah 0,98 Ci, maka waktu paruhnya adalah ....
   A. 162 jam
   B. 16 tahun
   C. 60 tahun
   D. 162 tahun
   E. 1614 tahun

39. Suatu zat radioaktif yang mempunyai aktivitas mula-mula 128 Ci, apabila zat radioaktif itu mempunyai waktu paroh 10 menit, maka setelah setengah jam kemudian aktivitas zat tersebut adalah ....
   A. 4 Ci
   B. 8 Ci
   C. 16 Ci
   D. 32 Ci
   E. 64 Ci

40. Sebuah partikel alfa ($_2He^4$) mempunyai massa 4,0026 sma, jika massa proton 1,0078 sma dan massa netron 1,0086 sma dan 1 sma = 931,5 MeV maka energi ikat partikel alfa adalah ....
A. 12,35 MeV
B. 24,56 MeV
C. 28,13 MeV
D. 32,62 MeV
E. 39,12 MeV

41. Reaksi inti berikut yang bukan reaksi fusi adalah ....
A. $_1H^1 + _1H^1 \rightarrow _1H^2 + _1e^0$
B. $_1H^2 + _1H^2 \rightarrow _2H^4$
C. $_7N^{14} + _0N^1 \rightarrow _6C^{12} + _1H^3$
D. $_2He^3 + _2He^3 \rightarrow _2He^4 + _1H^3$
E. $_1H^2 + _1H^3 \rightarrow _2He^4 + _0n^1$

42. Suatu zat radioaktif dalam waktu 30 hari jumlah zat yang meluruh $\frac{31}{32}$ bagian dari jumlah zat semula, maka waktu paroh zat radioaktif tersebut adalah ... hari.
A. 6
B. 12
C. 18
D. 20
E. 24

43. Apabila diketahui tetapan peluruhan suatu zat radioaktif adalah 0.0693 peluruhan per hari dan massa zat mula-mula 60 gram maka setelah 30 hari zat radioaktif yang tersisa adalah ....
A. 40 gram
B. 30 gram
C. 20 gram
D. 15 gram
E. 7,5 gram

44. Dalam reaksi inti berikut yang dinyatakan dengan A adalah ....

$$_3Li^6 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^4 + A$$

A. Proton
B. Neutron
C. Partikel alfa
D. Deutron
E. Triton

45. Suatu inti radioaktif memancarkan partikel alfa maka inti zat tersebut akan kehilangan ....

A. 2 neutron dan 4 proton
B. 2 elektron dan 4 proton
C. 2 proton dan 4 neutron
D. 2 proton dan 2 neutron
E. 2 elektron dan 2 proton

46. Suatu zat radioaktif mempunyai waktu paroh 20 hari, agar zat radioaktif yang tersisa tinggal 1/16 kali jumlah zat semula diperlukan waktu selama ... hari.

A. 30
B. 40
C. 60
D. 80
E. 90

47. Dalam reaksi inti berikut $_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow X + {}_1H^1 + Q$, unsur X yang terbentuk adalah ....

A. $_7N^{17}$
B. $_8O^{16}$
C. $_8O^{17}$
D. $_9F^{17}$
E. $_{10}Ne^{17}$

48. Bila diketahui energi ikat per nukleon untuk ${}_6C^{12}$ adalah 7,68 MeV dan untuk ${}_6C^{13}$ adalah 7,47 MeV. Maka besarnya energi yang diperlukan untuk melepaskan 1 neutron pada inti atom ${}_6C^{13}$ adalah ....
    A. 0,32 MeV
    B. 2,42 MeV
    C. 4,95 MeV
    D. 6,85 MeV
    E. 9,95 MeV

49. Manakah pernyataan di bawah ini yang benar ....
    A. peledakan bom atom adalah reaksi fusi
    B. reaksi fisi merupakan pemecahan inti berat menjadi inti-inti ringan
    C. energi yang dihasilkan reaksi fisi kecil
    D. partikel penyebab fisi adalah proton
    E. partikel penyebab fusi adalah neutron

50. Deret radioaktif yang memiliki nomor massa kelipatan 4n + 2 adalah ....
    A. deret uranium
    B. deret thorium
    C. deret neptunium
    D. deret aktinium
    E. deret plutonium

Daftar Pustaka

Arthur Beiser. 1999. *Konsep Fisika Modern*. Terjemahan DR. The Houw Liong. Jakarta: Erlangga.

Budikase, E.dan Kertiasa, N. 1996. *Fisika 3*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Baiquni, A. 1996. *Fisika Modern*. Jakarta: Balai Pustaka.

Ensiklopedi Sains dan Kehidupan. 2003. Jakarta : Tarity Samudra Berlian.

Frederick J. Bueche, Ph.D. 1999. *Teori dan Soal-Soal Fisika*. Terjemahan Drs. B. Darmawan, M.Sc. Jakarta: Erlangga.

Halliday dan Resnick. 1999 *Fisika Jilid 1*. Terjemahan Patur Silaban, Ph.D dan Drs. Erwin Sucipto, M.Sc. Jakarta : Erlangga.

__________________, 1999 *Fisika Jilid 2*. Terjemahan Patur Silaban, Ph.D dan Drs. Erwin Sucipto, M.Sc. Jakarta : Erlangga.

Ilmu Pengetahuan Populer. Jilid 5. 1999. Jakarta: Widyadara.

______________________. Jilid 10. 1999. Jakarta: Widyadara.

Lilik Hidayat Setyawan,Drs. *Kamus Fisika Bergambar*. 2004. Bandung: Pakar Raya.

Panduan Kurikulum Tingkat Satuan Pendidikan. 2006. Jakarta: Badan Standar Nasional Pendidikan.

Sains. Materi Pelatihan Terintegrasi Buku 3. 2004. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.

Tan Ik Gie, dkk.1999. *Fisika Modern*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Tipler, Paul A. *Fisika Untuk Sains dan Teknik Jilid 2*. 2001. Terjemahan Dra. Lea Prasetio, M.Sc. dan Rahmad W. A. Ph.D. Jakarta: Erlangga.

Yohanes Surya, Ph.D. 2001. *Fisika Itu Mudah Jilid 3C*. Tangerang: Bina Sumber Daya Mipa.

LAMPIRAN

Glosarium

Ampere	:	Satuan arus listrik; lambangnya adalah A.
Amperemeter	:	Alat untuk mengukur arus listrik.
Amplitudo gelombang	:	Jarak simpang getar yang terjauh dari sikap keseimbangan.
Arus efektif	:	Besarnya arus yang ditunjukkan oleh alat amperemeter AC.
Audio	:	Frekuensi gelombang bunyi yang dapat diterima telinga manusia normal berkisar antara 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz.
Bilangan kuantum utama	:	Bilangan kuantum yang menyatakan tingkat energi dari jari-jari orbital elektron atau kulit-kulit atom; diberi simbol n.
Bilangan kuantum orbital	:	Bilangan kuantum yang menyatakan besarnya momentum sudut elektron dalam mengelilingi inti atom, diberi simbol l.
Bilangan kuantum magnetik	:	Bilangan kuantum yang menyatakan arah dari momentum sudut elektron, diberi simbol m_l.
Bilangan kuantum spin	:	Bilangan kuantum yang menyatakan arah perputaran elektron terhadap sumbunya, diberi simbol m_s.
Benda hitam	:	Pemancar energi kalor paling baik sekaligus penyerap energi kalor yang baik.
Cepat rambat gelombang	:	Jarak yang ditempuh oleh gelombang dalam waktu satu sekon.
Daya	:	Energi yang diperlukan tiap satu satuan waktu atau tiap detiknya.
Deret radioaktif	:	Suatu deret nomor massa dengan aturan tertentu pada suatu atom karena proses peluruhan radioaktif yang terus-menerus hingga inti atom stabil.
Destruktif	:	Kedua gelombang cahaya yang berinterferensi saling memperlemah.

Difraksi cahaya	:	Peristiwa pelenturan cahaya ke belakang penghalang, seperti sisi dari celah.
Dilatasi waktu	:	Waktu relativitas, waktu yang diukur jam yang bergerak lebih besar dibandingkan waktu yang diukur oleh jam yang diam terhadap kejadian.
Efek Doppler	:	Peristiwa terjadinya perubahan frekuensi bunyi yang diterima oleh pendengar jika terjadi gerakan relatif antara sumber bunyi dan si pendengar.
Efek fotolistrik	:	Terlepasnya elektron dari penukaran logam karena logam tersebut disinari cahaya.
Efek Zeeman	:	Terpecahnya spektrum cahaya jika dilewatkan pada medan magnet yang kuat.
Efisiensi transformator	:	Perbandingan antara daya listrik keluaran (output) dengan daya listrik masukan (input).
Emisivitas	:	Konstanta yang besarnya tergantung pada sifat permukaan benda yang mempunyai nilai antara 0 hingga 1.
Farad	:	Satuan kapasitas kapasitor (C) dalam SI.
Fluks magnetik	:	Jumlah garis medan magnetik yang menembus permukaan bidang secara tegak lurus, notasinya Φ dengan satuan Weber.
Foton	:	Pancaran paket-paket energi dari cahaya.
Fungsi kerja	:	Energi terendah dari foton agar mampu menimbulkan efek fotolistrik.
Galvanometer	:	Peralatan yang peka untuk mengetahui dan mengukur arus listrik lemah.
Gaya Coulomb	:	Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua benda bermuatan listrik.
Gaya Lorentz	:	Gaya yang dialami oleh suatu muatan q yang bergerak dengan kecepatan V di dalam medan magnetik B. Besarnya gaya itu adalah : $F = q \cdot v \cdot B$ $= q \cdot v \cdot B \sin \theta$
Gelombang	:	Perubahan atau gangguan yang merambat, lazimnya melalui zat antara (medium).
Gelombang elektromagnetik	:	Gelombang yang dalam rambatannya tanpa memerlukan medium.

Gelombang mekanik	:	Gelombang yang dalam rambatannya memerlukan medium.
Gelombang stasioner	:	Gelombang yang terjadi jika dua gelombang yang mempunyai frekuensi dan amplitudo sama bertemu dalam arah yang berlawanan.
Gelombang transversal	:	Gelombang yang arah getarannya tegak lurus dengan arah rambatannya.
Generator	:	Alat yang digunakan untuk mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik.
GGL Induksi	:	Beda potensial yang terjadi pada ujung-ujung kumparan.
GGL Induksi diri	:	GGL induksi yang terjadi karena adanya perubahan fluks magnetik yang ditimbulkan oleh rangkaian itu sendiri.
Getaran	:	Gerak bolak-balik di sekitar suatu sikap keseimbangan.
Henry	:	Satuan induktansi diri kumparan dalam SI.
Impedansi	:	Nilai total dari hambatan seri RLC, dengan notasi Z.
Indeks bias	:	Perbandingan antara cepat rambat cahaya dalam ruang hampa dan cepat rambat cahaya dalam suatu medium.
Induksi magnet	:	Kuat medan magnetik yang dinyatakan dengan lambang B.
Induksi elektromagnetik	:	Peristiwa timbulnya beda potensial pada ujung-ujung kawat penghantar bila terjadi perubahan jumlah garis-garis gaya magnet yang dilingkupi kumparan.
Induktansi silang	:	Peristiwa perubahan arus pada kumparan 1 (primer) akan menimbulkan ggl induksi pada kumparan 2 (sekunder) atau sebaliknya.
Infrasonik	:	Gelombang bunyi yang frekuensinya kurang dari 20 Hz.
Interferensi gelombang	:	Perpaduan antara dua gelombang koheren atau lebih di suatu tempat dan saat yang bersamaan.
Inti atom	:	Bagian dari atom yang terdiri atas proton (bermuatan positif) dan neutron (tidak bermuatan/netral).

Isotop	:	Salah satu dari dua atau lebih atom yang mempunyai nomor atom sama, tetapi nomor massa berbeda.
Kapasitor	:	Dua pelat konduktor yang diletakkan sejajar, diberi muatan listrik yang sama besar, tetapi berlainan jenis.
Kapasitas kapasitor	:	Perbandingan antara banyaknya muatan listrik yang tersimpan dalam kapasitor dengan beda potensial yang timbul pada ujung-ujung kapasitor, diberi lambang C.
Konstruktif	:	Kedua gelombang cahaya yang berinterferensi saling memperkuat.
Kuat medan listrik	:	Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak dibagi besar muatan di suatu titik.
Kumparan primer	:	Kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan atau tegangan masukan.
Kumparan sekunder	:	Kumparan yang menghasilkan tegangan keluaran.
Medan listrik	:	Daerah di sekitar benda bermuatan listrik yang masih memiliki gaya listrik.
Medium	:	Zat perantara yang dilalui.
Nomor atom	:	Menyatakan jumlah proton dalam inti atom atau jumlah elektron yang mengelilingi inti.
Nomor massa	:	Menyatakan jumlah proton dan neutron yang terdapat pada inti atom atau jumlah nukleon.
Pembiasan cahaya	:	Peristiwa pembelokan arah perambatan cahaya.
Periode gelombang	:	Waktu yang dipergunakan untuk satu gelombang lengkap.
Perut gelombang	:	Tempat kedudukan titik-titik yang mempunyai amplitudo maksimum pada gelombang.
Polarisasi	:	Peristiwa penyerapan arah bidang getar dari gelombang.
Potensial listrik	:	Usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan listrik dari A ke B per jumlah muatan listrik.
Prisma	:	Suatu alat yang memisahkan cahaya putih menjadi warna-warna pembentuknya merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu.

Prisma akromatik	:	Susunan dua buah prisma yang terbuat dari bahan yang berbeda, disusun secara terbalik yang berfungsi untuk meniadakan sudut deviasi yang terjadi pada prisma tersebut.
Prisma pandang lurus	:	Susunan dua buah prisma yang disusun untuk menghilangkan sudut deviasi salah satu warna sinar, misalnya sinar hijau atau kuning.
Radioaktivitas	:	Peristiwa pemancaran sinar radioaktif secara spontan, disebut juga peluruhan radioaktif.
Radio isotop	:	Unsur yang selalu memancarkan sinar radiasi.
Reaksi fisi	:	Reaksi pembelahan inti atom berat menjadi dua inti atom lain yang lebih ringan dengan disertai timbulnya energi yang cukup besar.
Reaksi fusi	:	Reaksi penggabungan dua inti atom ringan menjadi inti atom lain yang lebih berat dengan melepaskan energi.
Reaktansi induktif	:	Hambatan yang berasal dari induktor (L), dengan notasi XL.
Reaktansi kapasitif	:	Hambatan yang berasal dari kapasitor (C), dengan notasi XC.
Reaktor atom	:	Tempat untuk berlangsungnya reaktor inti.
Relativitas Einstein	:	Teori relativitas yang menyelidiki gerak-gerak benda yang kecepatannya mendekati kecepatan cahaya. Dapat juga digunakan untuk gerak benda kecepatan rendah.
Relativitas Newton	:	Teori relativitas yang menjelaskan gerak-gerak benda yang kecepatannya jauh di bawah kecepatan cahaya.
Rotor	:	Bagian motor listrik yang bergerak, pada umumnya terdiri atas kumparan kawat yang dibelikat pada jangkar.
Simpul gelombang	:	Tempat kedudukan titik yang mempunyai amplitudo minimal (nol).
Sonar	:	Sistem menyerupai radar, tetapi menggunakan gelombang ultrasonik dalam air.
Solenoida	:	Kumparan yang panjang, di mana diameter kumparan lebih kecil dibandingkan dengan panjang kumparan, jarak antara lilitan yang satu dengan yang lainnya sangat rapat dan biasanya terdiri atas satu lapisan atau lebih.

Stator	:	Bagian dari motor listrik yang tidak bergerak, pada umumnya terdiri atas magnet tetap.
Tesla	:	Satuan induksi magnet dalam SI.
Toroida	:	Sebuah solenoida yang dilengkungkan sehingga membentuk lingkaran.
Voltmeter	:	Alat ukur tegangan listrik.
Waktu paruh	:	Waktu yang diperlukan oleh unsur radioaktif untuk meluruh hingga tinggal separuh dari jumlah unsur semula.

Indeks Pengarang

Indeks Subjek

F

G

H

I

R

S

T

U

V

W

Z

Tabel Tetapan

Waktu Paruh Deret Radioaktif

Inti Semula	Jenis Pancaran	Inti Hasil	Waktu Paruh
$_{92}U^{238}$	Sinar alfa	$_{90}Th^{234}$	$4,5 \times 10^{9}$ tahun
$_{90}Th^{234}$	Sinar beta	$_{91}Pa^{234}$	24,1 hari
$_{91}Pa^{234}$	Sinar beta	$_{92}U^{234}$	1,14 menit
$_{92}U^{234}$	Sinar alfa	$_{90}Th^{230}$	$2,5 \times 10^{5}$ tahun
$_{90}Th^{230}$	Sinar alfa	$_{88}Ra^{226}$	6×10^{4} tahun
$_{88}Ra^{226}$	Sinar alfa	$_{86}Rn^{222}$	1,622 tahun
$_{86}Rn^{222}$	Sinar alfa	$_{84}Po^{218}$	3,82 hari
$_{84}Po^{218}$	Sinar alfa	$_{82}Pb^{214}$	3 menit
$_{82}Pb^{214}$	Sinar beta	$_{83}Bi^{214}$	26,8 menit
$_{83}Bi^{214}$	Sinar beta	$_{84}Po^{214}$	19,7 menit
$_{84}Po^{214}$	Sinar alfa	$_{82}Pb^{210}$	$1,6 \times 10^{-4}$ detik
$_{82}Pb^{210}$	Sinar beta	$_{83}Bi^{210}$	22 tahun
$_{83}Bi^{210}$	Sinar beta	$_{84}Po^{210}$	5 hari
$_{84}Po^{210}$	Sinar alfa	$_{82}Pb^{206}$	140 hari
$_{82}Pb^{206}$	Stabil	-	-

Sumber : *Kamus Fisika Bergambar*; Drs. Lilik Hidayat S. 2004 Pakar Raya Bandung

Tabel Unsur-Unsur Zat

Nama Unsur	Lambang	Nomor Atom	Massa Atom Rata-rata
Hidrogen	H	1	1,00079
Helium	He	2	4,00260
Litium	Li	3	6,941
Berilium	Be	4	9,01218
Borium	B	5	10,81
Karbon	C	6	12,011
Nitrogen	N	7	14,0067
Oksigen	O	8	15,9994
Fluor	F	9	18,99840
Neon	Ne	10	20,179

Nama Unsur	Lambang	Nomor Atom	Massa Atom Rata-rata
Natrium	Na	11	22,98977
Magnesium	Mg	12	24,305
Alumunium	Al	13	26,98154
Silikon	Si	14	28,086
Fosfor	P	15	30,97376
Belerang	S	16	32,06
Klor	Cl	17	35,453
Argon	Ar	18	39,948
Kalium	K	19	39,098
Kalsium	Ca	20	40,08
Skandium	Sc	21	44,9559
Titanium	Ti	22	47,90
Vanadium	V	23	50,9414
Krom	Cr	24	51,996
Mangan	Mn	25	54,9380
Besi	Fe	26	55,847
Kobalt	Co	27	58,9332
Nikel	Ni	28	58,70
Tembaga	Cu	29	63,546
Seng	Zn	30	65,38
Galium	Ga	31	69,72
Germanium	Ge	32	72,59
Arsen	As	33	74,9216
Selenium	Se	34	78,96
Bromin	Br	35	79,904
Kripton	Kr	36	83,60
Rubidium	Rb	37	85,4678
Strontium	Sr	38	87,62
Itrium	Y	39	88,9095
Zirkonium	Zr	40	91,22
Niobium	Nb	41	92,9064
Molibdenum	Mo	42	95,94
Tektenium	Tc	43	(97)
Rutenium	Ru	44	101,07
Rodium	Rh	45	102,9055
Paladium	Pd	46	106,4
Perak	Ag	47	107,868
Kadmium	Cd	48	112,40

Nama Unsur	Lambang	Nomor Atom	Massa Atom Rata-rata
Indium	In	49	114,82
Timah	Sn	50	118,69
Antimon	Sb	51	121,75
Telurium	Te	52	127,60
Yodium	I	53	126,9045
Xenon	Xe	54	131,30
Cesium	Ce	55	132,9054
Barium	Ba	56	137,34
Lantanium	La	57	138,9055
Serium	Ce	58	140,12
Praseodimium	Pr	59	140,9077
Neodinium	Nd	60	144,24
Prometium	Pm	61	(145)
Samarium	Sm	62	150,4
Europium	Eu	63	151,96
Gadolinium	Gd	64	157,25
Terbium	Tb	65	158,9254
Disprosium	Dy	66	162,50
Holmium	Ho	67	164,9304
Erbium	Er	68	167,26
Tulium	Tm	69	168,9342
Iterbium	Yb	70	173,04
Lutetium	Lu	71	174,97
Hafnium	Hf	72	178,49
Titalium	Ta	73	180,9479
Wolfram	W	74	183,85
Renium	Re	75	186,207
Osmium	Os	76	190,2
Iridium	Ir	77	192,22
Platina	Pt	78	195,09
Emas	Au	79	196,9665
Raksa	Hg	80	200,59
Talium	Ta	81	204,37
Timbal	Pb	82	207,2
Bismut	Bi	83	208,9804
Polonium	Po	84	(209)
Astanium	At	85	(210)
Radon	Rn	86	(222)

Nama Unsur	Lambang	Nomor Atom	Massa Atom Rata-rata
Fransium	Fr	87	(223)
Radium	Ra	88	226,0254
Aktinium	Ac	89	(227)
Torium	Th	90	232,0381
Protaktinium	Pa	91	231,0359
Uranium	U	92	238,029
Neptonium	Np	93	237,0482
Plutonium	Pu	94	(244)
Amerisium	Am	95	(243)
Kurium	Cm	96	(247)
Berkelium	Bk	97	(247)
Kalifomium	Cf	98	(251)
Eisteinium	Es	99	(254)
Femium	Fm	100	(257)
Mendelevium	Md	101	(258)
Nobelium	No	102	(255)
Lawrensium	Lr	103	(260)
Ruterfordium	Rf	104	(257)
Dubnium	Db	105	(262)
Seaborgium	Sg	106	(266)

Sumber : *Kamus Fisika Bergambar*; Drs. Lilik Hidayat S. 2004 Pakar Raya Bandung

Besaran-Besaran dan Satuan

Besaran	Lambang	Satuan (Lambang)
Banyak panas	Q	Joule (J)
Jumlah Zat	N	mol (mol)
Daya	P	Watt (W)
Energi	E	Joule (J)
Frekwensi	f	Hertz (Hz)
Gaya	F	Newton (N)
Hambatan	R	Ohm (Ω)
Hambatan jenis	ρ	Ohm meter (Ω m)
Intensitas cahaya	I	Candela (Cd)
Panjang gelombang	l	Meter (m)
Kapasitas panas	C	Joule/Kelvin (JK^{-1})

Besaran	Lambang	Satuan (Lambang)
Kecepatan	v	Meter/sekon (ms^{-1})
Kuat arus	I	Ampere (A)
Koefsien muai panjang	α	Per Kelvin (K^{-1})
Koefisien muai volume	β	Per Kelvin (K^{-1})
Luas	A	Meter persegi (m^2)
Massa	M	Kilogram (kg)
Massa jenis	ρ	Kilogram/meter kubik (kgm^{-3})
Momen gaya	σ	Newton meter (Nm)
Momen kopel	M	Newton meter (Nm)
Muatan	q	Coulomb (C)
Panas jenis	c	Joule per kilogram Kelvin ($J\ kg^{-}K^{-1}$)
Panjang	R	Meter (m)
Percepatan	a	Meter per sekon kuadrat (ms^{-2})
Periode	T	Sekon (s)
Suhu	T	Kelvin (K)
Tegangan	V	Volt (V)
Tekanan	P	Paskal (Pa)
Taraf intensitas bunyi	TI	Decibell (dB)
Usaha	W	Joule (J)
Volume	V	Meter kubik (m^3)
Waktu	t	Sekon (s)

Sumber : *Kamus Fisika Bergambar*; Drs. Lilik Hidayat S. 2004 Pakar Raya Bandung

Tetapan dalam Fisika

Nama Tetapan	Lambang	
Cepat rambat cahaya	c	$2{,}9979 \times 10^8\ ms^{-1}$
Percepatan gravitasi	g	$9{,}807\ ms^{-2}$
Tetapan gravitasi umum	G	$6{,}670 \times 10^{-11}\ Nm^2kg^{-2}$
Tetapan Coulomb	k	$9 \times 10^9\ Nm^2C^{-2}$
Massa jenis air	-	$1000\ kg\ m^{-3}$
Massa jenis air raksa	-	$13596\ kg\ m^{-3}$
Atmosfer standar	*1 atm*	$1{,}0132 \times 10^5\ Nm^{-2}$
Volume gas ideal dalam keadaan normal (STP)	-	$22{,}4\ m^3\ kmol^{-1}$
Bilangan Avogadro	N_A	$6{,}022 \times 10^{23}\ kmol^{-1}$
Tetapan gas umum	R	$8314\ J\ kmol^{-1}K^{-1}$

Nama Tetapan	Lambang	
Titik lebur es	-	273,15 K
Tara kalor mekanik	A	4,184 J kal^{-1}
Tetapan Stefan-Boltzmann	σ	5,67 × 10^{-8} $Wm^{-2}K^{-4}$
Tetapan Planck	h	6,625 × 10^{-34} Js
Tetapan Wien	C	2,898 × 10^{-3} mK
Tetapan Faraday (1 Faraday)	F	9,6485 × 10^{4} C mol^{-1}
Muatan elektron	e	1,6022 × 10^{-19} C
Tetapan Boltzmann	k	1,38 × 10^{-23} J K^{-1}
e/m untuk elektron	e/m_e	1,7588 × 10^{11} C kg^{-1}
massa diam elektron	m_e	9,109 × 10^{-31} kg
massa diam proton	m_p	1,6726 × 10^{-27} kg
massa diam netron	m_n	1,6749 × 10^{-27} kg
massa diam partikel alfa	-	6,645 × 10^{-27} kg
satuan massa atom (1/12 massa $_6C^{12}$)	u (sma)	1,6606 × 10^{-27} kg
massa diam energi 1 u (sma)	-	931,5 MeV
Konstanta Rydberg	R	1,097 × 10^{7} m^{-1}
Permeabilitas ruang hampa	$å_o$	4p × 10^{7} Web $A^{-1}m^{-1}$
Permitivitas ruang hampa	$ì_o$	8,854 ×10^{12} C^2Nm^{-2}
Amstrong	Å	10^{-10} m
Elektron Volt	eV	1,6 × 10^{-19} J

Sumber : *Kamus Fisika Bergambar;* Drs. Lilik Hidayat S. 2004 Pakar Raya Bandung

Daftar Panjang Gelombang dan Indeks Bias Beberapa Warna Cahaya dalam Kaca Kerona, Flinta, dan Kuarts

Warna Cahaya	Panjang Gelombang dalam A^o	Indeks Bias dalam Kaca		
		Kerona	Flinta	Kuarts
Merah	6563	1,58848	1,58848	1,45640
	6439	1,52490	1,58896	1,45674
Kuning	5890	1,52704	1,59144	1,45845
Hijau	5338	1,52988	1,59463	1,46067
	5086	1,53146	1,59644	1,46191
Biru	4861	1,53303	1,59825	1,46318
Ungu	4340	1,53790	1,60367	1,46690
	3988	1,54245	1,60870	1,47030

Sumber : *EGM 2a;* 1986 Jakarta Depdikbud

Indeks Bias Berbagai Zat sebagai Zat Perantara untuk Cahaya dengan Panjang Gelombang (l) = 5894 A^o.

Nama Zat	Indeks Bias	Nama Zat	Indeks Bias
Udara	1,00029	Karbon disulsulfida	1,625
Hidrogen (0^{o}C, 1 atm)	1,00013	Es	1,310
Karbon hidroksida (0^{o}C.1atm)	1,00045	Balsam Kanada	1,530
Alkohol	1,360	Intan	2,417
Air	1,333	Kaca Kerona	1,517
Bensena	1,501	Kaca Flinta	1,576
Gliserin	1,475	Kaca kuart	1,4585
Sumber : *EGM 2a;* 1986 Jakarta Depdikbud			

Dua Awalan pada Satuan SI

Faktor Perkalian	Awalan	Lambang
10^{18}	eksa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^{8}	giga	G
10^{6}	mega	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hekto	h
10	deka	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	mikro	ì
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	piko	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	ato	a

Daftar Abjad Yunani

Huruf Besar	Huruf Kecil	Bacaan	Huruf Besar	Huruf Kecil	Bacaan
Α	α	alpha	Ν	ν	nu
Β	β	beta	Ξ	ξ	xi
Γ	γ	gamma	Ο	ο	omicron
Δ	Δ	delta	Π	π	pi
Ε	e	epsilon	Ρ	τ	rho
Ζ	ξ	zeta	Σ	σ	sigma
Η	η	eta	Τ	τ	tau
Θ	θ	theta	Υ	υ	upsilon
Ι	i	iota	Φ	φ	phi
Κ	k	kappa	Χ	x	chi
Λ	λ	lambda	Ψ	ψ	psi
Μ	μ	mu	Ω	ω	omega

Sumber : *Kamus Fisika Bergambar*; Drs. Lilik Hidayat S. 2004 Pakar Raya Bandung

Kunci Jawaban

Bab I Gelombang

A.	1.	C	6.	A
	2.	E	7.	E
	3.	C	8.	B
	4.	C	9.	C
	5.	E	10.	D

B. 2. λ = 2 m dan V = 2 m/s
4. TI = 80 dB

Bab II Cahaya

A.	1.	C	6.	A
	2.	E	7.	B
	3.	A	8.	A
	4.	B	9.	C
	5.	A	10.	D

B. 2. D = $38{,}5^o$
4. λ = $4{,}667.10^{-7}$ m

Bab III Elektrostatika

A.	1.	A	7.	D	12.	A
	2.	B	8.	A	13.	E
	3.	E	9.	D	14.	B
	4.	B	10.	B	15.	B
	5.	D	11.	E		
	6.	A				

B. 2. q = 1,1 mikro Coulomb
4. = 120 volt

Bab IV Medan Magnet

A.	1.	E	6.	C
	2.	B	7.	A
	3.	C	8.	A
	4.	B	9.	E
	5.	B	10.	C

B. 2. a) B = 0 T dan b) $B = 2.10^{-5}$ T
4. b) $B = 16\ \pi\ .10^{-4}$ T dan b) $B = 32\ \pi\ .10^{-4}$ T

Bab V Induksi Elektromagnetik

A. 1.	E	6.	C	11.	A
2.	A	7.	D	12.	D
3.	D	8.	A	13.	B
4.	B	9.	C	14.	B
5.	B	10.	A	15.	B

B. 2. I = 0,5 mA
4. $W = 6{,}25\ \pi\ .10^{-4}$ Joule

Bab VI Arus dan Tegangan Bolak-Balik

A. 1.	D	6.	B
2.	E	7.	D
3.	A	8.	C
4.	C	9.	B
5.	E	10.	A

B. 2. I = 2,2 A
4. f = 1028 Hz

Bab VII Dualisme Gelombang Cahaya

A. 1.	E	6.	D
2.	C	7.	B
3.	D	8.	B
4.	D	9.	D
5.	A	10.	B

B. 2. Teori gelombang gagal dalam menjelaskan peristiwa efek fotolistrik karena menurut teori gelombang dengan memperbesar intensitas cahaya akan dapat melepaskan elektron foto akan tetapi kenyataan tidak. Berapapun intensitas cahaya diperbesar jika frekuensi cahaya masih di bawah frekuensi ambang logam yang digunakan tidak akan mampu menimbulkan efek foto listrik. Tetapi jika frekuensi cahaya yang dijatuhkan lebih besar dari frekuensi ambang betapapun intensitasnya kecil mampu menimbulkan efek foto listrik.
3. Frekuensi cahayanya harus lebih besar dari $5{,}55\ .10^{14}$ Hz

Bab VIII Perkembangan Teori Atom

A.

1. B	6. C	11. D
2. B	7. B	12. A
3. C	8. A	13. B
4. D	9. C	14. C
5. D	10. B	15. B

B. 2. Untuk menutupi kelemahan model atom Futherford, Bohr mengemukakan tiga postulatnya yaitu :

a. Elektron-elektron bergerak mengelilingi inti atom dengan lintasan berbentuk lingkaran.

b. Elektron tidak dapat berputar pada sembarang lintasan tetapi hanya pada lintasan-lintasan tertentu yang memiliki momentum sudut sebesar $nh/2\pi$ yang disebut lintasan stasioner.

c. Elektron dapat berpindah dari lintasan (orbit) yang satu ke lintasan yang lain dengan menyerap atau memancarkan energi.

Elektron akan memancarkan energi jika berpindah dari lintasan luar ke lintasan dalam dan sebaliknya akan menyerap energi jika berpindah dari lintasan dalam ke lintasan luar. Energi yang dipancarkan dalam bentun foton.

4. a. Bilangan kuantum utamanya n = 3.

b. Bilangan kuantum orbitelnya $\ell = 2$.

c. Besarnya momentum sudut = $L = \hbar\sqrt{12}$

Bab IX Relativitas

A.

1. C	6. B
2. C	7. A
3. C	8. C
4. C	9. D
5. C	10. A

B. 2. V = 0,6 c

4. $V = \frac{1}{3}\sqrt{5}\ c$

Bab X Inti Atom dan Radioaktivitas

A.

1.	C	6.	A
2.	C	7.	B
3.	A	8.	C
4.	B	9.	D
5.	D	10.	A

B. 2. Energi ikat ${}_3Li^7$ = 37,26 MeV

4. Pada dasarnya reaktor nuklir (atom) berdasarkan kegunaannya dibedakan menjadi tiga yaitu reaktor daya, reaktor penelitian dan reaktor produksi isotop radioaktif. Sedangkan reaktor Kartini yang ada di Yogyakarta termasuk reaktor penelitian dan produksi isotop radioaktif.

Uji Kompetensi Akhir Semester 1

1.	D	21.	B	41.	E
2.	D	22.	A	42.	B
3.	C	23.	A	43.	B
4.	B	24.	D	44.	B
5.	B	25.	C	45.	C
6.	B	26.	B	46.	C
7.	E	27.	C	47.	B
8.	A	28.	A	48.	D
9.	B	29.	D	49.	C
10.	C	30.	C	50.	D
11.	B	31.	A		
12.	B	32.	B		
13.	D	33.	A		
14.	C	34.	D		
15.	B	35.	C		
16.	B	36.	B		
17.	A	37.	C		
18.	B	38.	B		
19.	C	39.	A		
20.	C	40.	C		

Uji Kompetensi Akhir Semester 2

1. D	21. A	41. C
2. B	22. E	42. A
3. C	23. A	43. E
4. B	24. B	44. C
5. B	25. D	45. D
6. D	26. D	46. D
7. A	27. D	47. C
8. D	28. D	48. C
9. D	29. D	49. B
10. C	30. C	50. A
11. C	31. C	
12. D	32. D	
13. C	33. E	
14. A	34. B	
15. B	35. A	
16. A	36. D	
17. E	37. E	
18. B	38. E	
19. C	39. C	
20. D	40. C	



ISBN 978-979-068-802-5 (no.jilid lengkap)
ISBN 978-979-068-810-0

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp 18.310,-

Suharyanto Karyono Dwi Satya Palupi

FISIKA 3 untuk SMA dan MA Kelas XII